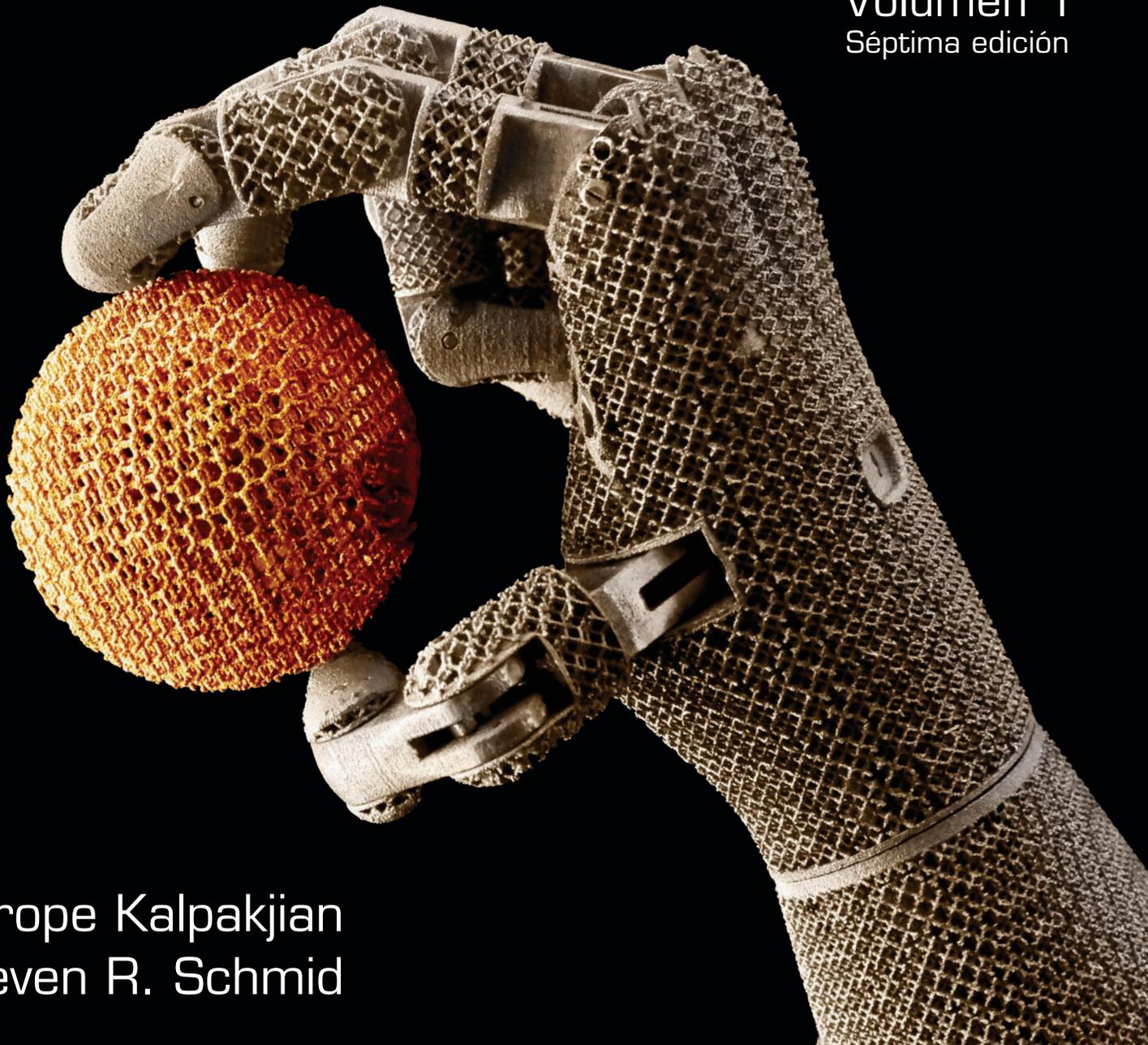


MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Ingeniería y tecnología de materiales

Volumen 1
Séptima edición



Serope Kalpakjian
Steven R. Schmid

LISTA DE TABLAS

Introducción general

- 1.1 Número aproximado de piezas en productos 1
- 1.2 Desarrollo histórico de materiales, herramientas y procesos de manufactura 3
- 1.3 Características generales de manufactura de diversos materiales 14
- 1.4 Esperanza de vida promedio para diversos productos 29
- 1.5 Costo relativo de reparación en diversas etapas del desarrollo y la venta de los productos 29
- 1.6 Desglose de costos típico en la industria manufacturera 31
- 1.7 Remuneración relativa aproximada por hora para los trabajadores manufactureros en 2010 (Estados Unidos = 100) 32

Parte I Fundamentos de los materiales: comportamiento y propiedades de manufactura

- 1.1 Tamaños de grano 46
- 1.2 Rangos de temperatura homólogos para varios procesos 50
- 2.1 Propiedades mecánicas relativas de diversos materiales a temperatura ambiente (en orden decreciente). Los metales están en su forma de aleación 56
- 2.2 Propiedades mecánicas de diversos materiales a temperatura ambiente 58
- 2.3 Valores típicos de K y n para los metales seleccionados 61
- 2.4 Rangos típicos de deformación y rapidez de deformación en los procesos de manufactura 64
- 3.1 Propiedades físicas a temperatura ambiente de los materiales seleccionados 89
- 3.2 Propiedades físicas de los materiales (en orden descendente) 90
- 4.1 Esquema de los procesos de tratamiento térmico utilizados para el endurecimiento superficial 120
- 5.1 Aplicaciones para los aceros al carbono y de aleación seleccionados 135
- 5.2 Efectos de diferentes elementos en los aceros 136
- 5.3 Propiedades mecánicas típicas de los aceros al carbono y de aleación seleccionados 138
- 5.4 Propiedades mecánicas de los aceros avanzados de alta resistencia seleccionados 139
- 5.5 Designaciones AISI para las hojas de acero de alta resistencia 140
- 5.6 Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de los aceros inoxidables recocidos a temperatura ambiente seleccionados 143
- 5.7 Tipos básicos de aceros para herramientas y dados 144
- 5.8 Características de procesamiento y servicio de los aceros comunes para herramientas y dados 145
- 5.9 Procesos metalúrgicos típicos en los materiales para herramientas y dados 146
- 6.1 Costo aproximado por unidad de volumen de metales forjados y plásticos en relación con el costo del acero al carbono 151
- 6.2 Características generales de los metales no ferrosos y sus aleaciones 151
- 6.3 Propiedades a temperatura ambiente de las aleaciones de aluminio seleccionadas 152
- 6.4 Características de manufactura y aplicaciones típicas de las aleaciones de aluminio forjado seleccionadas 153
- 6.5 Propiedades y formas típicas de las aleaciones de magnesio forjadas seleccionadas 155
- 6.6 Propiedades y aplicaciones típicas del cobre forjado y los latones seleccionados 157
- 6.7 Propiedades y aplicaciones típicas de los bronce forjados seleccionados 157
- 6.8 Propiedades y aplicaciones típicas de las aleaciones de níquel seleccionadas (todos los nombres son comerciales) 158
- 6.9 Propiedades y aplicaciones típicas de las superaleaciones (seleccionadas) a base de níquel, a 870 °C (1600 °F) (todos los nombres son comerciales) 159
- 6.10 Propiedades y aplicaciones típicas de las aleaciones de titanio forjado seleccionadas, a diferentes temperaturas 160
- 7.1 Rango de propiedades mecánicas para varios plásticos de ingeniería a temperatura ambiente 170

- 7.2 Temperaturas de transición vítrea y fusión de algunos polímeros 178
- 7.3 Recomendaciones generales para productos de plástico 183
- 7.4 Nombres comerciales de polímeros termoplásticos 184
- 8.1 Tipos, características generales y principales usos de los cerámicos 197
- 8.2 Propiedades de diversos cerámicos a temperatura ambiente 201
- 8.3 Propiedades de vidrios diversos 205
- 9.1 Tipos y características generales de los materiales compósitos 217
- 9.2 Propiedades típicas de las fibras de refuerzo 218
- 9.3 Materiales compósitos de matriz metálica y sus aplicaciones 227
- 9.4 Resumen de las propiedades de la fibra y del compuesto utilizados para una mordaza de frenos de automóvil 228

Parte II Procesos y equipos para la fundición de metales

- 10.1 Contracción o dilatación volumétrica por solidificación para diversos metales fundidos 249
- 11.1 Resumen de los procesos de fundición 257
- 11.2 Características generales de los procesos de fundición 259
- 11.3 Propiedades y aplicaciones típicas de algunas aleaciones comunes fundidas en dado 280
- 12.1 Tolerancia normal de contracción para algunos metales fundidos en moldes de arena 297
- 12.2 Aplicaciones típicas para las fundiciones y características de la fundición 305
- 12.3 Propiedades y aplicaciones típicas de los hierros fundidos 305
- 12.4 Propiedades mecánicas de los hierros fundidos grises 306
- 12.5 Propiedades y aplicaciones típicas de las aleaciones de fundiciones no ferrosas 306
- 12.6 Características generales de costo de los procesos de fundición 308

Parte III Procesos y equipos para formado y para dar forma

- III.1 Características generales de los procesos de formado y para dar forma 314
- 14.1 Características generales de los procesos de forjado 339
- 14.2 Rango de k valores para la ecuación (14.3) 344
- 14.3 Forjabilidad de los metales, en orden decreciente (vea también la tabla 15.1) 349
- 14.4 Rangos de velocidad típicos del equipo de forjado 356
- 14.5 Comparación de los diseños de suspensión vertical para el automóvil Lotus Elise 360
- 15.1 Rangos de temperatura de extrusión típicos para diversos metales y aleaciones (vea también la tabla 14.3) 369
- 16.1 Características generales de los procesos de formado de lámina metálica (en orden alfabético) 388
- 16.2 Características importantes de los metales utilizados para operaciones de formado de láminas metálicas 398
- 16.3 Radio mínimo de doblez para diversos metales a temperatura ambiente 403
- 16.4 Rangos típicos de la anisotropía normal promedio para diversos metales laminados 415
- 17.1 Presiones de compactación para diversos polvos 454
- 17.2 Temperatura y tiempo de sinterizado para diversos metales 462
- 17.3 Propiedades mecánicas de los materiales seleccionados que se fabrican por metalurgia de polvos 464
- 17.4 Comparación de las propiedades mecánicas de los metales forjados seleccionados y su equivalencia en la metalurgia de polvos (después del sinterizado) 465
- 17.5 Comparaciones de las propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti-6Al-4V 465
- 17.6 Piezas de titanio elaboradas por forjado y por metalurgia de polvos y el ahorro en sus costos 469
- 18.1 Características generales de procesamiento de cerámicos 476
- 19.1 Características generales de los procesos de formado y para dar forma a los plásticos y materiales compósitos 495
- 19.2 Comparativo de las características de producción para diversos métodos de moldeo 530

20.1	Características de las tecnologías del prototipado rápido aditivo	538	26.1	Rangos de dureza Knoop de distintos materiales y abrasivos	731
20.2	Propiedades mecánicas de los materiales seleccionados para el prototipado rápido	539	26.2	Requerimientos de la energía específica aproximada para rectificado de una superficie	740
Parte IV	Procesos de maquinado y máquinas herramienta		26.3	Rangos comunes de velocidades y avances para procesos abrasivos	746
21.1	Factores que influyen en las operaciones de maquinado	568	26.4	Características generales de los procesos de rectificado abrasivo y de rectificadoras	747
21.2	Rango aproximado de requerimientos de energía durante las operaciones de corte en el motor impulsor de la máquina herramienta (para herramientas melladas hay que multiplicar por 1.25)	579	26.5	Recomendaciones generales para el uso de fluidos en el rectificado	754
21.3	Rangos de n valores para la ecuación de Taylor (21.25) para distintos materiales de la herramienta	584	27.1	Características generales de los procesos del maquinado avanzado	771
21.4	Pista de desgaste promedio permisible (vea VB en la figura 21.15a) para herramientas de corte en varias operaciones de maquinado	602	27.2	Aplicaciones generales de los láseres en la manufactura	785
22.1	Características generales de los materiales para herramientas	602	27.3	Clasificación de satélites	792
22.2	Características generales de los materiales para herramientas de corte (estos materiales tienen un amplio rango de composiciones y propiedades; en muchas categorías existen características que se traslapan)	603	Parte VI	Procesos y equipos para unir	
22.3	Características generales de operación de los materiales para la herramienta de corte	603	VI.I	Comparación de varios métodos de unión	876
22.4	Clasificación ISO de herramientas de corte hechas de carburo de acuerdo con su uso	608	30.1	Características generales de los procesos de soldadura por fusión	878
22.5	Clasificación de carburos de tungsteno de acuerdo con las operaciones de maquinado requeridas	608	30.2	Energías específicas aproximadas que se requieren para fundir un volumen unitario de metales comunes por soldar	883
23.1	Características generales de los procesos de maquinado y tolerancias dimensionales comunes	627	30.3	Nomenclatura para electrodos de acero de bajo carbono (dulce) recubiertos	892
23.2	Recomendaciones generales para los ángulos de la herramienta en el torneado	629	32.1	Metales de aporte de uso común en la soldadura fuerte de varios metales y aleaciones	936
23.3	Resumen de parámetros y fórmulas para el torneado	631	32.2	Selección de soldaduras blandas comunes y sus aplicaciones más frecuentes	939
23.4	Recomendaciones generales para operaciones de torneado (sólo son una guía, en la práctica es frecuente que se excedan)	632	32.3	Propiedades y características comunes de adhesivos estructurales químicamente reactivos	944
23.5	Comparación de los parámetros de procesamiento para herramientas de SiN y BNc para trabajar el refrentado de un freno de disco	635	32.4	Características generales de los adhesivos	945
23.6	Recomendaciones generales para fluidos de corte en maquinado (vea también la sección 33.7)	637	Parte VII	Tecnología de superficies	
23.7	Capacidades comunes y dimensiones máximas de la pieza de trabajo para máquinas herramienta	638	34.1	Recubrimientos cerámicos usados para aplicaciones de alta temperatura	1000
23.8	Resumen de maquinado para el ejemplo 23.3	645	Parte VIII	Metrología, instrumentación y aseguramiento de la calidad en la ingeniería	
23.9	Tasas de producción comunes para varias operaciones de maquinado	646	35.1	Clases de ajuste	1026
23.10	Guía general de problemas en las operaciones de torneado	648	35.2	Tolerancias recomendadas en mm para las clases de ajuste	1026
23.11	Capacidades generales de las operaciones de taladrado y mandrinado	653	36.1	Los 14 puntos de Deming	1033
23.12	Recomendaciones generales para velocidades y avances en el taladrado	658	36.2	Constantes para las gráficas de control	1044
23.13	Guía general de problemas en las operaciones de taladrado	659	36.3	Datos para el ejemplo 36.3	1046
24.1	Resumen de los parámetros y fórmulas del fresado periférico	672	Parte IX	La manufactura en un ambiente competitivo	
24.2	Recomendaciones generales para las operaciones de fresado (note que estos valores son para una geometría particular de maquinado y con frecuencia se exceden en la práctica)	679	37.1	Historia de la automatización de los procesos de manufactura	1061
24.3	Guía general de solución de problemas en las operaciones de fresado	680	37.2	Cantidades aproximadas de producción anual	1064
			39.1	Comparación de las características generales de las líneas de transferencia y los sistemas de manufactura flexible	1128
			40.1	Referencias a varios temas en este libro (los números de página están entre paréntesis)	1143
			40.2	Contenido de energía de materiales seleccionados	1149
			40.3	Formas de materiales disponibles en el comercio	1149
			40.4	Desperdicios aproximados producidos en diversas operaciones de manufactura	1151
			40.5	Características generales de procesos de manufactura para varios metales y aleaciones	1155
			40.6	Costos relativos de la maquinaria y equipo	1160

Manufactura, ingeniería y tecnología

Volumen 1. Tecnología de materiales

Séptima edición

Serope Kalpakjian

Illinois Institute of Technology

Steven R. Schmid

The University of Notre Dame

TRADUCCIÓN

Jesús Elmer Murrieta Murrieta

Maestro en Investigación de Operaciones

Tecnológico de Monterrey, Campus Morelos

REVISIÓN TÉCNICA

Ulises Figueroa López

Francisco Javier Sandoval Palafox

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Tecnológico de Monterrey, Campus Estado de México

PEARSON

KALPAKJIAN, SEROPE y SCHMID, STEVEN R.

Manufactura, ingeniería y tecnología. Volumen 1.

Tecnología de materiales

Séptima edición

PEARSON, México, 2014

ISBN: 978-607-32-2736-0

Área: Ingeniería

Formato: 21 × 27 cm

Páginas: 608

Authorized translation from the English language edition entitled *Manufacturing, Engineering and Technology 7th edition* by *SEROPE KALPAKJIAN; STEVEN R. SCHMID*, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2014. All rights reserved.

ISBN 9780133128741

Traducción autorizada de la edición en idioma inglés titulada *Manufacturing, Engineering and Technology 7th edición* por *SEROPE KALPAKJIAN; STEVEN R. SCHMID*, publicada por Pearson Education, Inc., publicada como Prentice Hall, Copyright © 2014. Todos los derechos reservados.

Esta edición en español es la única autorizada.

Edición en español

Dirección General: Philip de la Vega
Dirección Educación Superior: Santiago Gutiérrez
Editor Sponsor: Luis M. Cruz Castillo
e-mail: luis.cruz@pearson.com
Editor de Desarrollo: Bernardino Gutiérrez Hernández
Supervisor de Producción: José D. Hernández Garduño
Gerencia Editorial
Educación Superior: Marisa de Anta

Séptima edición, 2014

D.R. © 2014 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Atacomulco 500-5o. piso

Col. Industrial Atoto

53519, Naucalpan de Juárez, Estado de México

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. núm. 1031.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del editor o de sus representantes.

ISBN VERSIÓN IMPRESA: 978-607-32-2735-3

ISBN VERSIÓN E-BOOK: 978-607-32-2736-0

ISBN E-CHAPTER: 978-607-32-2737-7

ISBN E-TEXT: 978-607-32-2738-4

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

PEARSON

A la memoria de

Margaret Jean Kalpakjian

*“Y nunca se ha sabido que el amor no conoce su propia profundidad
hasta el momento de la separación”.*

Khalil Gibran

Contenido

Prefacio xxv

Acerca de los autores xxix

VOLUMEN 1

Introducción general 1

- I.1 ¿Qué es la manufactura? 1
- I.2 Diseño del producto e ingeniería concurrente 6
- I.3 Diseño para manufactura, ensamble, desensamble y servicio 10
- I.4 Diseño y manufactura verdes 11
- I.5 Selección de materiales 13
- I.6 Selección de procesos de manufactura 16
- I.7 Manufactura integrada por computadora 25
- I.8 Aseguramiento de la calidad y administración de la calidad total 28
- I.9 Producción esbelta y manufactura ágil 30
- I.10 Costos de manufactura y competencia global 31
- I.11 Tendencias en la manufactura 32

Parte I: Fundamentos de los materiales: comportamiento y propiedades de manufactura 35

1 Estructura de los metales 38

- 1.1 Introducción 38
- 1.2 Tipos de enlaces atómicos 39
- 1.3 Estructura cristalina de los metales 40
- 1.4 Deformación y resistencia de los monocristales 42
- 1.5 Granos y límites de grano 45
- 1.6 Deformación plástica de los metales policristalinos 48
- 1.7 Recuperación, recristalización y crecimiento del grano 49
- 1.8 Trabajo en frío, trabajo en tibio y trabajo en caliente 50
- Resumen 51 Términos clave 51 Bibliografía 52*
- Preguntas de repaso 52 Problemas cualitativos 52*
- Problemas cuantitativos 53 Síntesis, diseño y proyectos 54*

2 Comportamiento mecánico, pruebas y propiedades de manufactura de los materiales 55

- 2.1 Introducción 55
- 2.2 Tensión 56

2.3	Compresión	65
2.4	Torsión	66
2.5	Doblado (flexión)	67
2.6	Dureza	67
2.7	Fatiga	73
2.8	Termofluencia	74
2.9	Impacto	74
2.10	Falla y fractura de los materiales	75
2.11	Esfuerzos residuales	80
2.12	Trabajo, calor y temperatura	81
	<i>Resumen</i>	82
	<i>Términos clave</i>	83
	<i>Bibliografía</i>	83
	<i>Preguntas de repaso</i>	84
	<i>Problemas cualitativos</i>	84
	<i>Problemas cuantitativos</i>	85
	<i>Síntesis, diseño y proyectos</i>	86

3 Propiedades físicas de los materiales 88

3.1	Introducción	88
3.2	Densidad	89
3.3	Punto de fusión	92
3.4	Calor específico	92
3.5	Conductividad térmica	93
3.6	Dilatación térmica	93
3.7	Propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas	94
3.8	Resistencia a la corrosión	95
	<i>Resumen</i>	97
	<i>Términos clave</i>	98
	<i>Bibliografía</i>	98
	<i>Preguntas de repaso</i>	98
	<i>Problemas cualitativos</i>	98
	<i>Problemas cuantitativos</i>	99
	<i>Síntesis, diseño y proyectos</i>	99

4 Aleaciones metálicas: su estructura y endurecimiento mediante tratamiento térmico 101

4.1	Introducción	101
4.2	Estructura de las aleaciones	102
4.3	Diagramas de fase	104
4.4	El sistema hierro-carbono	107
4.5	Diagrama de fase hierro-carburo de hierro y desarrollo de microestructuras en los aceros	108
4.6	Hierros fundidos	109
4.7	Tratamiento térmico de aleaciones ferrosas	111
4.8	Templabilidad de aleaciones ferrosas	113
4.9	Tratamiento térmico de aleaciones no ferrosas y aceros inoxidables	117
4.10	Endurecimiento superficial	119
4.11	Recocido	121
4.12	Hornos y equipos para el tratamiento térmico	123
4.13	Consideraciones de diseño para el tratamiento térmico	124

Resumen 125 *Términos clave* 126 *Bibliografía* 126
Preguntas de repaso 126 *Problemas cualitativos* 127
Problemas cuantitativos 127 *Síntesis, diseño y proyectos* 127

5 Aleaciones y los metales ferrosos: producción, propiedades generales y aplicaciones 128

5.1 Introducción 128
5.2 Producción de hierro y acero 129
5.3 Vaciado de lingotes 132
5.4 Fundición continua 133
5.5 Aceros al carbono y aleados 135
5.6 Aceros inoxidables 142
5.7 Aceros para herramientas y dados 144
Resumen 145 *Términos clave* 146 *Bibliografía* 147
Preguntas de repaso 147 *Problemas cualitativos* 147
Problemas cuantitativos 148 *Síntesis, diseño y proyectos* 148

6 Metales no ferrosos y sus aleaciones: producción, propiedades generales y aplicaciones 150

6.1 Introducción 150
6.2 Aluminio y aleaciones de aluminio 151
6.3 Magnesio y aleaciones de magnesio 155
6.4 Cobre y aleaciones de cobre 156
6.5 Níquel y aleaciones de níquel 158
6.6 Superaleaciones 159
6.7 Titanio y aleaciones 160
6.8 Metales refractarios y sus aleaciones 161
6.9 Berilio 162
6.10 Circonio 162
6.11 Aleaciones de bajo punto de fusión 162
6.12 Metales preciosos 164
6.13 Aleaciones con memoria de forma (materiales inteligentes) 164
6.14 Aleaciones amorfas (vidrios metálicos) 165
6.15 Espumas metálicas 165
Resumen 166 *Términos clave* 166 *Bibliografía* 166
Preguntas de repaso 167 *Problemas cualitativos* 167
Problemas cuantitativos 167 *Síntesis, diseño y proyectos* 168

7 Polímeros: estructura, propiedades generales y aplicaciones 169

7.1 Introducción 169
7.2 Estructura de los polímeros 171
7.3 Termoplásticos 178

7.4	Plásticos termofijos	181
7.5	Aditivos en los plásticos	182
7.6	Propiedades generales y aplicaciones de los termoplásticos	183
7.7	Propiedades generales y aplicaciones de los plásticos termofijos	186
7.8	Plásticos biodegradables	187
7.9	Elastómeros (hules)	188
	<i>Resumen</i>	189
	<i>Términos clave</i>	190
	<i>Bibliografía</i>	190
	<i>Preguntas de repaso</i>	191
	<i>Problemas cualitativos</i>	191
	<i>Problemas cuantitativos</i>	192
	<i>Síntesis, diseño y proyectos</i>	193

8 Cerámicos, vidrio, grafito, diamante y nanomateriales: estructura, propiedades generales y aplicaciones 194

8.1	Introducción	194
8.2	Estructura de los cerámicos	195
8.3	Propiedades generales y aplicaciones de los cerámicos	200
8.4	Vidrios	204
8.5	Vitrocerámicos	206
8.6	Grafito	207
8.7	Diamante	209
8.8	Nanomateriales	210
	<i>Resumen</i>	211
	<i>Términos clave</i>	212
	<i>Bibliografía</i>	212
	<i>Preguntas de repaso</i>	212
	<i>Problemas cualitativos</i>	213
	<i>Problemas cuantitativos</i>	213
	<i>Síntesis, diseño y proyectos</i>	213

9 Materiales compósitos: estructura, propiedades generales y aplicaciones 215

9.1	Introducción	215
9.2	Estructura de los plásticos reforzados	216
9.3	Propiedades de los plásticos reforzados	221
9.4	Aplicaciones de los plásticos reforzados	224
9.5	Compósitos de matriz metálica	226
9.6	Compósitos de matriz cerámica	228
9.7	Otros compósitos	229
	<i>Resumen</i>	230
	<i>Términos clave</i>	230
	<i>Bibliografía</i>	230
	<i>Preguntas de repaso</i>	231
	<i>Problemas cualitativos</i>	231
	<i>Problemas cuantitativos</i>	232
	<i>Síntesis, diseño y proyectos</i>	232

Parte II: Procesos y equipos para la fundición de metales 235

10 Fundamentos de la fundición de metales 237

- 10.1 Introducción 237
 - 10.2 Solidificación de los metales 238
 - 10.3 Flujo del fluido 243
 - 10.4 Fluidez del metal fundido 246
 - 10.5 Transferencia de calor 247
 - 10.6 Defectos 249
- Resumen 252 Términos clave 252 Bibliografía 253*
Preguntas de repaso 253 Problemas cualitativos 253
Problemas cuantitativos 254 Síntesis, diseño y proyectos 255

11 Procesos y equipos de fundición de metales 256

- 11.1 Introducción 256
 - 11.2 Procesos de fundición de molde desechable y modelo permanente 260
 - 11.3 Procesos de fundición de molde y modelo desechables 269
 - 11.4 Procesos de fundición de molde permanente 276
 - 11.5 Técnicas de fundición para componentes monocristalinos 284
 - 11.6 Solidificación rápida 286
 - 11.7 Inspección de piezas fundidas 287
 - 11.8 Procedimientos y hornos de fusión 287
 - 11.9 Fundidoras y automatización de fundidoras 289
- Resumen 289 Términos clave 290 Bibliografía 290*
Preguntas de repaso 290 Problemas cualitativos 291
Problemas cuantitativos 291 Síntesis, diseño y proyectos 292

12 Fundición de metales: diseño, materiales y consideraciones económicas 294

- 12.1 Introducción 294
 - 12.2 Consideraciones de diseño en la fundición 294
 - 12.3 Aleaciones para las fundiciones 303
 - 12.4 Consideraciones económicas en la fundición 308
- Resumen 309 Términos clave 309 Bibliografía 309*
Preguntas de repaso 310 Problemas cualitativos 310
Problemas cuantitativos 310 Síntesis, diseño y proyectos 311

Parte III: Procesos y equipos para formado y para dar forma 313

13 Procesos y equipos para la laminación de metales 316

- 13.1 Introducción 316
- 13.2 Proceso de laminación plana 318
- 13.3 Práctica de la laminación plana 323
- 13.4 Molinos de laminación 326
- 13.5 Diversidad de procesos y molinos de laminación 328
- Resumen 333 Términos clave 333 Bibliografía 334*
- Preguntas de repaso 334 Problemas cualitativos 334*
- Problemas cuantitativos 335 Síntesis, diseño y proyectos 336*

14 Procesos y equipos para el forjado de metales 337

- 14.1 Introducción 337
- 14.2 Forjado en dado abierto 339
- 14.3 Forjado con dado impresor y en dado cerrado 342
- 14.4 Diversas operaciones de forjado 345
- 14.5 Forjabilidad de los metales; defectos de forjado 349
- 14.6 Diseño de dados, materiales para dados y lubricación 351
- 14.7 Métodos para la fabricación de dados y fallas en los dados 354
- 14.8 Máquinas de forjado 355
- 14.9 Economía del forjado 358
- Resumen 360 Términos clave 361 Bibliografía 361*
- Preguntas de repaso 362 Problemas cualitativos 362*
- Problemas cuantitativos 362 Síntesis, diseño y proyectos 363*

15 Procesos y equipos para extrusión y trefilado de metales 364

- 15.1 Introducción 364
- 15.2 El proceso de extrusión 366
- 15.3 Extrusión en caliente 368
- 15.4 Extrusión en frío 372
- 15.5 Defectos en la extrusión 374
- 15.6 Consideraciones de diseño 376
- 15.7 Equipos para extrusión 376
- 15.8 El proceso de trefilado 377
- 15.9 Práctica del trefilado 379
- 15.10 Defectos y esfuerzos residuales en el trefilado 382
- 15.11 Equipos para trefilado 382
- Resumen 383 Términos clave 384 Bibliografía 384*
- Preguntas de repaso 384 Problemas cualitativos 384*
- Problemas cuantitativos 385 Síntesis, diseño y proyectos 385*

16 Procesos y equipos para el formado de láminas metálicas 386

- 16.1 Introducción 386
 - 16.2 Cizallamiento 387
 - 16.3 Características y formabilidad de la lámina metálica 397
 - 16.4 Pruebas de formabilidad para láminas metálicas 399
 - 16.5 Doblado de láminas, placas y tubos 402
 - 16.6 Dobladados diversos y operaciones de formado relacionadas 406
 - 16.7 Embutido profundo 411
 - 16.8 Formado de hule e hidroformado 419
 - 16.9 Rechazado 423
 - 16.10 Formado superplástico 426
 - 16.11 Estampado en caliente 427
 - 16.12 Procesos de formado especializados 428
 - 16.13 Manufactura de estructuras metálicas en forma de panal 433
 - 16.14 Consideraciones de diseño en el formado de láminas metálicas 434
 - 16.15 Equipo para el formado de láminas metálicas 437
 - 16.16 Economía de las operaciones para el formado de láminas metálicas 438
- Resumen* 439 *Términos clave* 440 *Bibliografía* 440
Preguntas de repaso 440 *Problemas cualitativos* 441
Problemas cuantitativos 441 *Síntesis, diseño y proyectos* 442

17 Procesos y equipos para los metales en polvo 444

- 17.1 Introducción 444
 - 17.2 Producción de polvos metálicos 445
 - 17.3 Compactación de polvos metálicos 450
 - 17.4 Sinterizado 461
 - 17.5 Operaciones secundarias y de acabado 464
 - 17.6 Consideraciones de diseño 466
 - 17.7 Economía de la metalurgia de polvos 469
- Resumen* 471 *Términos clave* 471 *Bibliografía* 471
Preguntas de repaso 472 *Problemas cualitativos* 472
Problemas cuantitativos 473 *Síntesis, diseño y proyectos* 473

18 Cerámicos, vidrios y superconductores: procesamiento y equipo 475

- 18.1 Introducción 475
- 18.2 Moldeado de cerámicos 476
- 18.3 Formado y moldeado del vidrio 483
- 18.4 Técnicas para reforzar y tratar térmicamente al vidrio 486
- 18.5 Consideraciones de diseño para cerámicos y vidrios 489
- 18.6 Procesamiento de superconductores 489

Resumen 491 *Términos clave* 491 *Bibliografía* 492
Preguntas de repaso 492 *Problemas cualitativos* 492
Problemas cuantitativos 493 *Síntesis, diseño y proyectos* 493

19 Plásticos y materiales compósitos: formado y otros procesos para dar forma 494

- 19.1 Introducción 494
- 19.2 Extrusión 495
- 19.3 Moldeo por inyección 502
- 19.4 Moldeo por soplado 509
- 19.5 Moldeo rotacional 509
- 19.6 Termoformado 511
- 19.7 Moldeo por compresión 512
- 19.8 Moldeo por transferencia 513
- 19.9 Colado 514
- 19.10 Moldeo de espuma 515
- 19.11 Formado en frío y formado en fase sólida 516
- 19.12 Procesamiento de elastómeros 517
- 19.13 Procesamiento de compósitos de matriz polimérica 518
- 19.14 Procesamiento de compósitos de matriz metálica y cerámica 527
- 19.15 Consideraciones de diseño 528
- 19.16 Economía del procesamiento de plásticos y materiales compósitos 530

Resumen 531 *Términos clave* 531 *Bibliografía* 532
Preguntas de repaso 532 *Problemas cualitativos* 532
Problemas cuantitativos 533 *Síntesis, diseño y proyectos* 533

20 Procesos y operaciones del prototipado rápido 535

- 20.1 Introducción 535
- 20.2 Procesos sustractivos 538
- 20.3 Procesos aditivos 540
- 20.4 Prototipado virtual 551
- 20.5 Máquinas autorreplicantes 552
- 20.6 Manufactura directa y creación rápida de herramientas 553

Resumen 560 *Términos clave* 560 *Bibliografía* 560
Preguntas de repaso 561 *Problemas cualitativos* 561
Problemas cuantitativos 562 *Síntesis, diseño y proyectos* 562

Volumen 2

Parte IV: Procesos de maquinado y máquinas herramientas 563

21 Fundamentos de maquinado 566

- 21.1 Introducción 566
 - 21.2 Mecánica de corte 567
 - 21.3 Fuerzas y potencia en el proceso de corte 577
 - 21.4 Temperaturas durante el proceso de corte 580
 - 21.5 Vida de la herramienta: desgaste y falla 582
 - 21.6 Acabado e integridad de la superficie 589
 - 21.7 Maquinabilidad 591
- Resumen* 595 *Términos clave* 596 *Bibliografía* 596
Preguntas de repaso 596 *Problemas cualitativos* 597
Problemas cuantitativos 598 *Síntesis, diseño y proyectos* 599

22 Materiales para la herramienta de corte y fluidos de corte 600

- 22.1 Introducción 600
 - 22.2 Aceros de alta velocidad 604
 - 22.3 Aleaciones fundidas de cobalto 605
 - 22.4 Carburos 605
 - 22.5 Herramientas recubiertas 609
 - 22.6 Cerámicos base alúmina 612
 - 22.7 Nitruro de boro cúbico 613
 - 22.8 Cerámicos con base en nitruro de silicio 614
 - 22.9 Diamante 614
 - 22.10 Materiales y nanomateriales reforzados con triquitas 615
 - 22.11 Costos y reacondicionamiento de herramientas 616
 - 22.12 Fluidos de corte 616
- Resumen* 622 *Términos clave* 622 *Bibliografía* 622
Preguntas de repaso 623 *Problemas cualitativos* 623
Problemas cuantitativos 624 *Síntesis, diseño y proyectos* 624

23 Procesos de maquinado: torneado y producción de orificios 625

- 23.1 Introducción 625
 - 23.2 Torneado 628
 - 23.3 Tornos y operaciones en tornos 636
 - 23.4 Mandrinado y máquinas para mandrinar 651
 - 23.5 Taladrado, brocas y taladros 652
 - 23.6 Rimado y rimas 661
 - 23.7 Machuelado y machuelos 662
- Resumen* 664 *Términos clave* 665 *Bibliografía* 665
Preguntas de repaso 665 *Problemas cualitativos* 666
Problemas cuantitativos 666 *Síntesis, diseño y proyectos* 667

24 Procesos de maquinado: fresado, brochado, aserrado, limado y manufactura de engranes 668

- 24.1 Introducción 668
- 24.2 Fresado y fresadoras 669
- 24.3 Cepillado 684
- 24.4 Brochado y brochadoras 684
- 24.5 Aserrado 688
- 24.6 Limado 692
- 24.7 Manufactura de engranes por medio de maquinado 692
- Resumen* 699 *Términos clave* 700 *Bibliografía* 700
- Preguntas de repaso* 700 *Problemas cualitativos* 700
- Problemas cuantitativos* 701 *Síntesis, diseño y proyectos* 702

25 Centros de maquinado, estructuras de las máquinas herramienta y economía del maquinado 703

- 25.1 Introducción 703
- 25.2 Centros de maquinado 703
- 25.3 Estructuras de máquinas herramienta 712
- 25.4 Vibración y traqueteo en las operaciones de maquinado 716
- 25.5 Maquinado de alta velocidad 719
- 25.6 Maquinado de alta dureza 720
- 25.7 Maquinado de ultraprecisión 721
- 25.8 Economía del maquinado 722
- Resumen* 726 *Términos clave* 726 *Bibliografía* 727
- Preguntas de repaso* 727 *Problemas cualitativos* 727
- Problemas cuantitativos* 728 *Síntesis, diseño y proyectos* 728

26 Operaciones de maquinado y acabado con abrasivos 729

- 26.1 Introducción 729
- 26.2 Abrasivos y abrasivos aglutinados 731
- 26.3 Proceso de rectificado 737
- 26.4 Operaciones de rectificado y rectificadoras 746
- 26.5 Consideraciones de diseño en el rectificado 755
- 26.6 Maquinado ultrasónico 755
- 26.7 Operaciones de acabado 756
- 26.8 Operaciones de desbarbado 761
- 26.9 Economía de las operaciones de maquinado y acabado con abrasivos 764
- Resumen* 765 *Términos clave* 765 *Bibliografía* 766
- Preguntas de repaso* 766 *Problemas cualitativos* 767
- Problemas cuantitativos* 767 *Síntesis, diseño y proyectos* 768

27 Procesos de maquinado avanzado y sus equipos 769

- 27.1 Introducción 769
- 27.2 Maquinado químico 770
- 27.3 Maquinado electroquímico 775
- 27.4 Rectificado electroquímico 779
- 27.5 Electroerosión 780
- 27.6 Maquinado con rayo láser 784
- 27.7 Maquinado con haz de electrones 787
- 27.8 Maquinado con chorro de agua 788
- 27.9 Maquinado con chorro abrasivo 790
- 27.10 Sistemas de maquinado híbrido 790
- 27.11 Economía de los procesos de maquinado avanzado 791
- Resumen* 794 *Términos clave* 794 *Bibliografía* 795
- Preguntas de repaso* 795 *Problemas cualitativos* 795
- Problemas cuantitativos* 796 *Síntesis, diseño y proyectos* 796

NOTA AL LECTOR

El capítulo 28 “Fabrication of Microelectronic Devices” (correspondiente a las páginas 797 a 840) y el capítulo 29 “Fabrication of Microelectro-mechanical Devices and Systems; Nanoscale Manufacturing” (correspondiente a las páginas 841 a 872) se encuentran en formato PDF, en inglés, en la página web de este libro.

Part V: Micromanufacturing and Fabrication of Microelectronic Devices 797

28 Fabrication of Microelectronic Devices 800

- 28.1 Introduction 800
- 28.2 Clean Rooms 803
- 28.3 Semiconductors and Silicon 804
- 28.4 Crystal Growing and Wafer Preparation 805
- 28.5 Film Deposition 807
- 28.6 Oxidation 809
- 28.7 Lithography 810
- 28.8 Etching 818
- 28.9 Diffusion and Ion Implantation 825
- 28.10 Metallization and Testing 827
- 28.11 Wire Bonding and Packaging 830
- 28.12 Yield and Reliability 835
- 28.13 Printed Circuit Boards 835
- Summary* 837 *Key Terms* 838 *Bibliography* 838
- Review Questions* 838 *Qualitative Problems* 839
- Quantitative Problems* 839 *Synthesis, Design, and Projects* 840

29 Fabrication of Microelectromechanical Devices and Systems; Nanoscale Manufacturing 841

- 29.1 Introduction 841
- 29.2 Micromachining of MEMS Devices 843
- 29.3 Electroforming-based Processes 854
- 29.4 Solid Free-form Fabrication of Devices 861
- 29.5 Nanoscale Manufacturing 866
- Summary* 869 *Key Terms* 869 *Bibliography* 869
- Review Questions* 870 *Qualitative Problems* 870
- Quantitative Problems* 870 *Synthesis, Design, and Projects* 871

Parte VI: Procesos y equipos para unir 873

30 Procesos de soldadura por fusión 877

- 30.1 Introducción 877
- 30.2 Soldadura con gas oxicomcombustible 877
- 30.3 Procesos de soldadura por arco: electrodo no consumible 882
- 30.4 Procesos de soldadura por arco: electrodo consumible 885
- 30.5 Electrodo para soldadura por arco 890
- 30.6 Soldadura con haz de electrones 892
- 30.7 Soldadura con rayo láser 893
- 30.8 Corte 894
- 30.9 Unión soldada, calidad y prueba de la soldadura 896
- 30.10 Diseño de la unión y selección del proceso 905
- Resumen* 908 *Términos clave* 909 *Bibliografía* 909
- Preguntas de repaso* 909 *Problemas cualitativos* 910
- Problemas cuantitativos* 910 *Síntesis, diseño y proyectos* 911

31 Procesos de soldadura de estado sólido 912

- 31.1 Introducción 912
- 31.2 Soldadura en frío y unión por rolado 913
- 31.3 Soldadura ultrasónica 914
- 31.4 Soldadura por fricción 915
- 31.5 Soldadura con resistencia 917
- 31.6 Soldadura por explosión 925
- 31.7 Soldadura por difusión 926
- 31.8 Economía de las operaciones de soldadura 928
- Resumen* 930 *Términos clave* 930 *Bibliografía* 931
- Preguntas de repaso* 931 *Problemas cualitativos* 931
- Problemas cuantitativos* 932 *Síntesis, diseño y proyectos* 932

32 Soldadura fuerte, soldadura blanda, unión con adhesivos y procesos de sujeción mecánica 934

- 32.1 Introducción 934
- 32.2 Soldadura fuerte 935
- 32.3 Soldadura blanda 939
- 32.4 Unión adhesiva 943
- 32.5 Sujeción mecánica 949
- 32.6 Unión de plásticos, cerámicos y vidrios 953
- 32.7 Economía de las operaciones de unión 957
- Resumen 958 Términos clave 958 Bibliografía 959*
- Preguntas de repaso 959 Problemas cualitativos 959*
- Problemas cuantitativos 960 Síntesis, diseño y proyectos 960*

Parte VII: Tecnología de superficies 961

33 Rugosidad de una superficie y su medición; fricción, desgaste y lubricación 963

- 33.1 Introducción 963
- 33.2 Estructura e integridad de una superficie 964
- 33.3 Textura y rugosidad de una superficie 966
- 33.4 Fricción 969
- 33.5 Desgaste 973
- 33.6 Lubricación 976
- 33.7 Fluidos en el trabajo de metales y su selección 978
- Resumen 981 Términos clave 982 Bibliografía 982*
- Preguntas de repaso 983 Problemas cualitativos 983*
- Problemas cuantitativos 984 Síntesis, diseño y proyectos 984*

34 Tratamientos, recubrimientos y limpieza de superficies 985

- 34.1 Introducción 985
- 34.2 Tratamientos mecánicos de la superficie 986
- 34.3 Deposición y chapeado mecánicos 987
- 34.4 Endurecimiento superficial y revestimiento duro 988
- 34.5 Rociado térmico 988
- 34.6 Deposición de vapor 989
- 34.7 Implantación iónica y recubrimiento por difusión 993
- 34.8 Tratamientos con láser 993
- 34.9 Electrodeposición, deposición no electrolítica y electroformado 994
- 34.10 Recubrimientos de conversión 998
- 34.11 Inmersión en caliente 998
- 34.12 Porcelanizado; recubrimientos cerámicos y orgánicos 999

- 34.13 Recubrimientos de diamante y de carbono similar al diamante 1000
- 34.14 Texturizado de la superficie 1001
- 34.15 Pintura 1001
- 34.16 Limpieza de las superficies 1002
- Resumen 1004 Términos clave 1004 Bibliografía 1004*
- Preguntas de repaso 1005 Problemas cualitativos 1005*
- Problemas cuantitativos 1005 Síntesis, diseño y proyectos 1005*

Parte VIII: Metrología, instrumentación y aseguramiento de la calidad en la ingeniería 1007

35 Metrología e instrumentación en la ingeniería 1008

- 35.1 Introducción 1008
- 35.2 Patrones de medición 1008
- 35.3 Características geométricas de las partes: mediciones analógicas y digitales 1010
- 35.4 Métodos e instrumentos de medición tradicionales 1010
- 35.5 Instrumentos y máquinas modernos de medición 1017
- 35.6 Medición automatizada 1020
- 35.7 Características generales y selección de los instrumentos de medición 1021
- 35.8 Dimensionamiento geométrico y tolerancias 1021
- Resumen 1027 Términos clave 1027 Bibliografía 1027*
- Preguntas de repaso 1028 Problemas cualitativos 1028*
- Problemas cuantitativos 1029 Síntesis, diseño y proyectos 1029*

36 Aseguramiento, prueba e inspección de la calidad 1030

- 36.1 Introducción 1030
- 36.2 Calidad del producto 1031
- 36.3 Aseguramiento de la calidad 1031
- 36.4 Administración total de la calidad 1032
- 36.5 Métodos Taguchi 1034
- 36.6 Los estándares ISO y QS 1038
- 36.7 Métodos estadísticos de control de calidad 1039
- 36.8 Control estadístico del proceso 1042
- 36.9 Confiabilidad de los productos y procesos 1048
- 36.10 Pruebas no destructivas 1048
- 36.11 Pruebas destructivas 1052
- 36.12 Inspección automatizada 1052

Resumen 1053 *Términos clave* 1054 *Bibliografía* 1054
Preguntas de repaso 1054 *Problemas cualitativos* 1055
Problemas cuantitativos 1055 *Síntesis, diseño y proyectos* 1056

Parte IX: La manufactura en un ambiente competitivo 1057

37 Automatización de los procesos y operaciones de manufactura 1059

- 37.1 Introducción 1059
- 37.2 Automatización 1061
- 37.3 Control numérico 1068
- 37.4 Control adaptativo 1074
- 37.5 Manejo y movimiento de materiales 1077
- 37.6 Robots industriales 1078
- 37.7 Tecnología de sensores 1085
- 37.8 Sujeción flexible 1089
- 37.9 Sistemas de ensamble 1090
- 37.10 Consideraciones de diseño para la sujeción, el ensamble, desensamble y servicio 1094
- 37.11 Consideraciones económicas 1096

Resumen 1097 *Términos clave* 1098 *Bibliografía* 1098
Preguntas de repaso 1098 *Problemas cualitativos* 1099
Problemas cuantitativos 1099 *Síntesis, diseño y proyectos* 1099

38 Manufactura asistida por computadora 1101

- 38.1 Introducción 1101
- 38.2 Sistemas de manufactura 1102
- 38.3 Manufactura integrada por computadora 1102
- 38.4 Diseño e ingeniería asistidos por computadora 1105
- 38.5 Manufactura asistida por computadora 1110
- 38.6 Planeación del proceso asistida por computadora 1110
- 38.7 Simulación en computadora de los procesos y sistemas de manufactura 1113
- 38.8 Tecnología de grupos 1114

Resumen 1122 *Términos clave* 1122 *Bibliografía* 1122
Preguntas de repaso 1123 *Problemas cualitativos* 1123
Síntesis, diseño y proyectos 1123

39 Sistemas de manufactura integrados por computadora 1124

- 39.1 Introducción 1124
- 39.2 Manufactura celular 1125

39.3	Sistemas de manufactura flexible	1126
39.4	Manufactura holónica	1129
39.5	Producción justo a tiempo	1131
39.6	Manufactura esbelta	1132
39.7	Las redes de comunicación en la manufactura	1134
39.8	Inteligencia artificial	1135
39.9	Consideraciones económicas	1138
	<i>Resumen</i>	1138
	<i>Términos clave</i>	1139
	<i>Bibliografía</i>	1139
	<i>Preguntas de repaso</i>	1139
	<i>Problemas cualitativos</i>	1140
	<i>Síntesis, diseño y proyectos</i>	1140

40 Diseño y manufactura del producto en un ambiente competitivo 1141

40.1	Introducción	1141
40.2	Diseño del producto	1142
40.3	Calidad del producto	1145
40.4	Evaluación del ciclo de vida y manufactura sustentable	1145
40.5	Consumo de energía durante la manufactura	1147
40.6	Selección del material para los productos	1149
40.7	Sustitución de materiales	1151
40.8	Capacidades del proceso de manufactura	1153
40.9	Selección del proceso	1155
40.10	Costos de manufactura y su reducción	1158
	<i>Resumen</i>	1162
	<i>Términos clave</i>	1162
	<i>Bibliografía</i>	1162
	<i>Preguntas de repaso</i>	1163
	<i>Problemas cualitativos</i>	1163
	<i>Síntesis, diseño y proyectos</i>	1164

Índice 563

Casos de estudio

- I.1: Bates de béisbol 15
- I.2: Centavos estadounidenses 16
- I.3: Saleros y pimenteros 24
- I.4: Molde para armazones de lentes para el sol 27
- 3.1: Selección de materiales para acuñar monedas 97
- 5.1: Aceros avanzados de alta resistencia en automóviles 142
- 5.2: Aceros inoxidable en automóviles 144
- 6.1: Un automóvil totalmente de aluminio 154
- 7.1: Cemento óseo dental y médico 175
- 7.2: Uso de los polímeros eléctricamente conductores en baterías recargables 181
- 7.3: Materiales para forro de puertas de refrigerador 187
- 8.1: Cuchillos cerámicos 198
- 8.2: Barril de pistola cerámico 203
- 8.3: Cojinetes de bola y rodillos cerámicos 203
- 9.1: Cascos militares y chalecos antibalas hechos de materiales compósitos 225
- 9.2: Mordazas de frenos de material compósito con matriz de aluminio 227
- 9.3: Compósitos en la industria aeronáutica 229
- 11.1: Fundición de espuma perdida (modelo evaporable o consumible) para monoblocks de motor 270
- 11.2: Componentes superaleados de turbinas de gas fundidos por revestimiento 273
- 11.3: Fundición por revestimiento de prótesis totales de rodilla 274
- 11.4: Fundición en dado de un montaje de faro 281
- 12.1: Ejemplos ilustrativos de fundiciones con diseños pobres y buenos 301
- 14.1: Manufactura de un pasador escalonado mediante las operaciones de cabeceado y penetrado 347
- 14.2: Componentes de la suspensión del automóvil Lotus Elise 359
- 15.1: Manufactura de disipadores de calor de aluminio 371
- 15.2: Pieza extruida en frío 373
- 16.1: Lámina metálica soldada a la medida para aplicaciones automotrices 393
- 16.2: Manufactura de latas para alimentos y bebidas 418
- 16.3: Hidroformado de tubo para el soporte de un radiador automotriz 421
- 16.4: Manufactura de címbalos (platillos) 431
- 17.1: Prensado isostático en caliente de un elevador de válvula 456
- 17.2: Componentes del teléfono móvil fabricados mediante moldeo por inyección de metal 458
- 17.3: Piezas elaboradas por metalurgia de polvos en un quitanieves 470
- 18.1: Producción de cintas superconductoras para altas temperaturas 490
- 19.1: Paneles de polímero para carrocerías automotrices formados mediante diversos procesos 524
- 19.2: Fabricación de raquetas de tenis Head Protector® 525
- 19.3: Rotores de freno y camisas de cilindro hechos de material compósito con matriz metálica 527
- 20.1: Prototipado rápido funcional 536
- 20.2: Diseño de una cafetera 544
- 20.3: Producción de avatares de Second Life 547

- 20.4: Accesorios para el fuselaje de helicópteros 548
- 20.5: Alineadores ortodóncicos Invisalign® 553
- 20.6: Fundición de accesorios de plomería 558
- 23.1: Maquinado de frenos de disco 635
- 23.2: Retenedor para tornillo en hueso 663
- 24.1: Brochado de estrías internas 687
- 24.2: Palos *putt* de golf 690
- 25.1: Maquinado de pistas exteriores para rodamientos en un centro de torneado 710
- 27.1: Maquinado electroquímico de un implante biomédico 777
- 27.2: Manufactura de pequeños satélites 791
- 31.1: Soldadura de pistones por fricción 929
- 32.1: Curado ligero de adhesivos acrílicos para productos médicos 955
- 36.1: Manufactura de equipos de televisión por Sony Corporation 1036
- 37.1: Eliminación robotizada de las rebabas en un trineo moldeado por soplado 1084

Prefacio

En esta séptima edición, nuestro objetivo sigue siendo proporcionar un libro de texto completo y vanguardista sobre ingeniería de manufactura y tecnología, con los objetivos adicionales de motivar y crear desafíos en los estudiantes durante el estudio de esta importante disciplina. Al igual que en las ediciones anteriores, el libro presenta una visión general, con énfasis en una cobertura especialmente cualitativa de la ciencia, la tecnología y la práctica de la manufactura. Hemos incluido una descripción detallada de los aspectos fundamentales de los procesos de manufactura, las operaciones y la empresa manufacturera.

El libro sigue ocupándose de los diversos desafíos y aspectos de las operaciones y los procesos modernos de manufactura, que van desde los tradicionales procesos de fundición, formado, maquinado y unión, hasta los avanzados, como la fabricación de dispositivos microelectrónicos, los sistemas microelectromecánicos y la nanofabricación. El texto ofrece numerosos ejemplos y casos prácticos, así como una cobertura amplia y actualizada de todos los temas relacionados con la manufactura moderna, como una base sólida de apoyo para estudiantes y profesionales.

Nuevo en esta edición

Esta nueva edición se ha dividido en dos volúmenes. El volumen I (capítulos 1 a 20) consta de los temas de Ingeniería y Tecnología de materiales; el volumen II (capítulos 21 a 40) consta de los temas de Procesos de Manufactura. Los capítulos 28 y 29 se encuentran en inglés en la página Web del libro.

En respuesta a las sugerencias de varios de nuestros colegas y sus alumnos, en esta edición hemos realizado muchos cambios:

- Debido a la proliferación de los teléfonos inteligentes y la nueva capacidad de navegación por internet de estos teléfonos y tabletas, se han introducido *códigos QR*. Cada código es un vínculo a un video. Al margen se muestra un ejemplo de código QR como los que encontrará a lo largo del texto.
- 65 videos de manufactura proporcionan a los estudiantes el contexto del mundo real y les permiten ver una demostración interactiva de los aspectos pertinentes o de las estrategias para resolver problemas.

Nota: Debe descargar un lector de códigos QR a su smartphone o tablet. Pueden aplicar cargos.

- Donde se consideró apropiado, las *ilustraciones* y los *ejemplos* han sido sustituidos por otros nuevos para mostrar los últimos avances en la manufactura.
- Con el fin de proporcionar una mejor perspectiva de los temas tratados, el texto contiene múltiples *referencias cruzadas* a capítulos, secciones, tablas e ilustraciones relacionadas dentro del libro.
- Las *preguntas* y los *problemas*, así como los *proyectos* para análisis en clase, presentados al final de cada capítulo, se han ampliado considerablemente.
- La *bibliografía* al final de cada capítulo se ha actualizado por completo.
- Se ha hecho todo lo posible para que las *figuras* y *tablas* se ubiquen en la misma página donde están referidas en el texto; esto ha sido posible gracias a la reorganización del diseño de cada página, lo que incluye el uso de los márgenes.

El texto ha sido editado a fondo y totalmente actualizado. Las modificaciones específicas incluyen:

1. La ampliación de los análisis sobre el carbono en sus formas útiles, como nanotubos y grafeno (sección 8.6).
2. Ampliación de las consideraciones del diseño de productos para procesos de manufactura (varios capítulos).



Código QR 2.1 Ensayo de flexión de 3 puntos Instron 5544. (Fuente: Cortesía de Instron®).

3. Servoprensas para el forjado y el formado de hojas metálicas (sección 14.8).
4. Estampado en caliente de hojas metálicas (sección 16.11).
5. Análisis ampliado del sinterizado, las propiedades del material, la compactación explosiva, la densificación por rollo y la síntesis por combustión en la metalurgia de polvos (capítulo 17).
6. Estudio del formado neto por láser de ingeniería y máquinas autorreplicantes en el prototipado rápido (capítulo 20).
7. Sistemas de enfriamiento a través de la herramienta en el maquinado (sección 22.1.2).
8. Láser electrolítico MicroJet y maquinado por arco azul (capítulo 27).
9. Detección visual (sección 37.7)
10. Análisis del flujo de producción (sección 38.8)
11. Desarrollo de MTConnect (sección 39.7)
12. Consumo de energía en la manufactura (sección 40.5)

Para el profesor

Los profesores que lleven este libro como texto en un curso, pueden solicitar el *Manual de Soluciones para el profesor* el cual está disponible en inglés en el sitio web del libro. Consulte a su representante de Pearson.

A quién está dirigido el libro

El libro está dirigido a estudiantes de ingeniería mecánica, de manufactura, industrial, aeroespacial, metalúrgica y de materiales, así como de ingeniería biomédica. El uso de este texto también es apropiado en programas profesionales asociados en colegios y universidades comunitarias. Esperamos que, mediante la lectura de los dos volúmenes de este libro, los estudiantes comiencen a apreciar el papel fundamental de la ingeniería de manufactura y la tecnología en nuestra vida cotidiana y en las actividades profesionales; asimismo, esperamos que vean a esta disciplina como un tema académico tan emocionante, desafiante e importante como cualquiera otra de las disciplinas de la ingeniería.

Estaremos muy agradecidos por los comentarios y sugerencias que puedan hacer los profesores y estudiantes sobre la naturaleza y el contenido de los temas que se presentan, así como por la notificación de cualquier error en el texto y en las ilustraciones que puedan haber escapado a nuestra atención durante la elaboración del presente libro. Envíe sus comentarios o sugerencias a Steven R. Schmid, schmid.2@nd.edu o a Serope Kalpakjian, kalpakjian@iit.edu.

Traducciones

Existen varias ediciones de este libro y de nuestro otro libro, *Manufacturing Processes for Engineering Material*, en chino, coreano, español, italiano y alemán.

Agradecimientos

Es un gran placer agradecer la ayuda de los siguientes colegas en la preparación y publicación de la presente edición: K. Scott Smith, de la University of North Carolina en Charlotte; Steven Hayashi, de General Electric corp.; James Adams, de Metal Powder Industries Federation; Timotius Pasang, de la Auckland University of Technology en Nueva Zelanda; Miguel Sellés Cantó de la Escola Politècnica Superior d'Alcoi, Universitat Politècnica de València, España; y Megan McGann y Holly Weiss, de la University of Notre Dame. También reconocemos a Kent M. Kalpakjian, de Micron Technology como el autor original del capítulo 28 (Fabrication of Microelectronic Devices, en in-

glés en el sitio web), y queremos dar las gracias a Flora Derminjan, de Micron Technology, y Vahagn Sargsyan, de Carl Zeiss Nano Technology Systems, por la revisión de ese capítulo para la presente edición. Gracias también a los revisores de esta edición: Keng Hsu, de la University of Illinois at Urbana-Champaign; Wayne Hung, de la Texas A&M University; Stephen Jenkins, del Wor-Wic Community College; Edward Red, de la Brigham Young University; David Veazie, de la Southern Polytechnic State University; Yan Wang, del Worcester Polytechnic Institute; y a Y. Lawrence Yao, de la Columbia University.

También queremos dar las gracias a Holly Stark, nuestra editora de Prentice Hall, por su apoyo y guía entusiasta, y a Clare Romeo, jefa de producción, por su meticulosa supervisión editorial y de producción. Asimismo agradecemos la ayuda de las siguientes personas en la producción de esta edición del libro: Renata Butera, editora de medios; Carlin Heinle, asistente editorial, y Black Horse Designs, por el diseño de las portadas.

A continuación presentamos una lista acumulada de todas las personas que generosamente han hecho contribuciones a varias ediciones de los dos libros.

B. J. Aaronson	A. Cinar	P. Grigg	J. Lewandowski
R. Abella	R. O. Colantonio	M. Grujicic	X. Z. Li
D. Adams	P. Cotnoir	P. J. Guichelaar	Z. Liang
S. Arellano	P. J. Courtney	B. Harriger	B. W. Lilly
D. D. Arola	P. Demers	D. Harry	D. A. Lucca
R. A. Arlt	D. Descoteaux	M. Hawkins	M. Madou
V. Aronov	M. F. DeVries	R. J. Hocken	S. Mantell
A. Bagchi	R. C. Dix	E. M. Honig, Jr.	L. Mapa
E. D. Baker	M. Dollar	Y. Huang	R. J. Mattice
J. Barak	D. A. Dornfeld	S. Imam	C. Maziar
J. Ben-Ari	H. I. Douglas	R. Ivester	T. McClelland
G. F. Benedict	M. Dugger	R. Jaeger	L. McGuire
S. Bhattacharyya	D. R. Durham	C. Johnson	K. E. McKee
JT. Black	D. Duvall	D. Kalisz	K. P. Meade
W. Blanchard	S. A. Dynan	J. Kamman	M. H. Miller
C. Blathras	K. F. Ehmann	S. G. Kapoor	T. S. Milo
G. Boothroyd	J. El Gomayel	R. L. Kegg	D. J. Morrison
D. Bourell	M. G. Elliott	W. J. Kennedy	S. Mostovoy
B. Bozak	N. X. Fang	R. Kerr	C. Nair
N. N. Breyer	E. C. Feldy	T. Kesavadas	P. G. Nash
C. A. Brown	J. Field	J. E. Kopf	J. Nazemetz
R. G. Bruce	G. W. Fischer	R. J. Koronkowski	E. M. Odom
J. Cesarone	D. A. Fowley	J. Kotowski	U. Pal
T. C. Chang	R. L. French	S. Krishnamachari	S. J. Parelukar
R. L. Cheaney	B. R. Fruchter	K. M. Kulkarni	T. Pasang
A. Cheda	D. Furrer	T. Lach	Z. J. Pei
S. Chelikani	R. Giese	L. Langseth	J. Penaluna
S. Chen	E. Goode	M. Levine	M. Philpott
S. W. Choi	K. L. Graham	B. S. Levy	M. Pradheeradhi
J. M. Prince	S. Shepel	T. Tagliavore	J. F. Wang
D. W. Radford	R. Shivpuri	M. Tarabishy	K. J. Weinmann
W. J. Riffe	M. T. Siniawski	K. S. Taraman	R. Wertheim
R. J. Rogalla	J. E. Smallwood	R. Taylor	K. West
Y. Rong	J. P. Sobczak	B. S. Thakkar	J. Widmoyer
A. A. Runyan	L. Soisson	A. Trager	K. R. Williams
G. S. Saletta	P. Stewart	A. Tseng	G. Williamson
M. Salimian	J. Stocker	C. Tszang	B. Wiltjer
M. Savic	L. Strom	M. Tuttle	P. K. Wright
W. J. Schoech	A. B. Strong	J. Vigneau	N. Zabaraz
S. A. Schwartz	K. Subramanian	G. A. Volk	
M. Selles	T. Sweeney	G. Wallace	

También agradecemos a las numerosas organizaciones, empresas e individuos que nos proporcionaron muchas de las ilustraciones y casos prácticos. Estas contribuciones han sido reconocidas de manera expresa en el texto.

SEROPE KALPAKJIAN

STEVEN R. SCHMID

Acerca de los autores

Serope Kalpakjian es profesor emérito de ingeniería mecánica y de materiales en el Illinois Institute of Technology en Chicago. Es el autor de *Mechanical Processing of Materials* (Van Nostrand, 1967) y coautor de *Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations* (con E. S. Nachtman, Dekker, 1985). Las primeras ediciones de dos de sus libros, *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (Addison-Wesley 1984) y *Manufacturing Engineering and Technology* (Addison-Wesley, 1989) recibieron el premio M. Eugene Merchant de la SME al mejor libro de manufactura. Ha realizado investigaciones en diversas áreas de los procesos de manufactura, es autor de numerosos trabajos y artículos en revistas especializadas, manuales y enciclopedias técnicas, y ha editado varias memorias de ponencias. También ha sido editor y coeditor de varias revistas especializadas y ha sido miembro del consejo editorial de la *Encyclopedia Americana*.

El profesor Kalpakjian ha recibido el *premio al mejor artículo* de la Forging Industry Educational and Research Foundation (1966), el *premio a la excelencia en la enseñanza* del Illinois Institute of Technology (1970), la *medalla centenaria de ASME* (1980), y el *premio internacional a la educación de SME* (1989), fue nombrado *una persona del milenio por el IIT* (1999) y recibió el *premio Albert Easton White por excelencia en la enseñanza* de ASM International (2000); el premio de SME *jóvenes sobresalientes en Ingeniería de Manufactura* para el año 2002 fue nombrado en su honor. El profesor Kalpakjian es un miembro vitalicio de ASME, miembro del SME, miembro vitalicio de ASM International, miembro emérito de la International Academy for Production Engineering (CIRP), y fue presidente y miembro fundador de la North American Manufacturing Research Institution/SME. Se graduó con honores en el Robert College (Estambul), la Harvard University y el Massachusetts Institute of Technology.

Steven R. Schmid es profesor asociado en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial de la University of Notre Dame, donde imparte clases e investiga en las áreas generales de manufactura, diseño de máquinas y tribología. Recibió su grado de Ingeniería Mecánica por el Illinois Institute of Technology (con honores) y de maestría y doctorado en Ingeniería Mecánica por la Northwestern University. Ha recibido numerosos premios, incluyendo el *premio John T. Parsons* de SME (2000), el *premio Newkirk* de ASME (2000), el *premio a la enseñanza de Kaneb Center* (2000 y 2003) y el *premio Ruth and Joel Spira a la excelencia en la enseñanza* (2005). También le fueron otorgados un *premio CAREERS* por la *National Science Foundation* (1996) y un premio de la *ALCOA Foundation* (1994).

El profesor Schmid es autor de más de 100 artículos técnicos, es coautor de *Fundamentals of Machine Elements* (McGraw-Hill), *Fundamentals of Fluid Film Lubrication* (Dekker), *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (Prentice Hall), y ha contribuido con dos capítulos del *CRC Handbook of Modern Tribology*. Es un ingeniero profesional registrado, ingeniero de manufactura certificado por el SME, miembro del North American Research Institution, y miembro de la ASME. En 2012, fue nombrado miembro de la ASME Foundation Swanson y se desempeñó como subdirector de sociedades de investigación en la oficina del programa nacional de manufactura avanzada del National Institute for Science and Technology.

Introducción general

1.1 ¿Qué es la manufactura?

Al comenzar a leer este capítulo, tómese unos minutos para inspeccionar diversos objetos que haya a su alrededor: lapicero, lámpara, silla, teléfono móvil y computadora. Pronto se dará cuenta de que todos estos objetos, y sus numerosos componentes individuales, están hechos de una variedad de materiales que se han producido y ensamblado para fabricar los artículos que ahora ve. También observará que algunos objetos, como un clip para papel, un clavo, una cuchara y una llave para puerta están hechos de un solo componente. Sin embargo, como se observa en la tabla I.1, la gran mayoría de los objetos que nos rodean constan de numerosas piezas individuales que se construyen y ensamblan mediante una combinación de procesos llamada manufactura. Esto se ilustra de buena manera mediante el tractor mostrado en la figura I.1, donde se resaltan varios componentes y sus materiales.

La palabra *manufacture* (manufactura) apareció por primera vez en inglés en 1567 y se deriva del latín *manu factus*, que significa “hecho a mano”. La palabra *manufacturing* se conoció por primera vez en 1683 y la palabra *producción*, que se utiliza a menudo de manera intercambiable con el término *manufactura*, surgió inicialmente en algún momento del siglo xv.

Manufactura se refiere a la fabricación de productos. Un producto manufacturado puede, a su vez, utilizarse para fabricar otros productos, como (a) una gran prensa para elaborar carrocerías de automóvil a partir de láminas metálicas; (b) un taladro para producir agujeros; (c) una máquina de coser industrial para fabricar prendas de vestir en grandes cantidades y (d) maquinaria para producir una variedad sin fin de elementos individuales, los cuales van desde alambre delgado para guitarras y motores eléctricos hasta cigüeñales y bielas para motores de automóvil.

Artículos tales como clavos, pernos, tornillos, tuercas, arandelas y clips para papel son *productos discretos*, es decir, artículos individuales. Por el contrario, un carrete de alambre, tubería de metal o de plástico y un rollo de papel aluminio son *productos continuos* que, luego de ser fabricados, se cortan en piezas individuales de varias longitudes para fines específicos.

Debido a que un artículo manufacturado suele comenzarse con materias primas que son sometidas entonces a una secuencia de procesos para fabricar productos individuales, el artículo tiene cierto valor. Por ejemplo, la arcilla tiene cierto valor al ser extraída, pero cuando se forma con ella un producto como, digamos, un utensilio de cocina, una pieza de cerámica, un aislante eléctrico o una herramienta de corte, se le *agrega* valor. De igual modo, un clavo tiene un valor que está por encima del costo de la pequeña pieza de alambre o barra metálica de que está hecho. Productos como *chips* de computadora, motores eléctricos, implantes médicos, máquinas herramientas y aviones se conocen como productos de *alto valor agregado*.

Breve historia de la manufactura. La manufactura data del periodo ubicado entre los años 5000 y 4000 a. C. (tabla I.2), por lo que es más antigua que la historia registrada (la cual se remonta a los sumerios alrededor del año 3500 a. C. Las pinturas rupestres, así como las marcas realizadas en tabletas de arcilla y piedra, necesitaron de (a) alguna forma de pincel y alguna especie de pigmento, como puede apreciarse en las pinturas rupestres prehistóricas de Lascaux, Francia, que tienen una antigüedad estimada en 16 000 años; (b) algunos medios para, primero, marcar las tablillas de arcilla

1.1	¿Qué es la manufactura?	1
1.2	Diseño del producto e ingeniería concurrente	6
1.3	Diseño para manufactura, ensamble, desensamble y servicio	10
1.4	Diseño y manufactura verdes	11
1.5	Selección de materiales	13
1.6	Selección de procesos de manufactura	16
1.7	Manufactura integrada por computadora	25
1.8	Aseguramiento de la calidad y administración de la calidad total	28
1.9	Producción esbelta y manufactura ágil	30
1.10	Costos de manufactura y competencia global	31
1.11	Tendencias en la manufactura	32

CASOS DE ESTUDIO:

1.1	Bates de béisbol	15
1.2	Centavos estadounidenses	16
1.3	Saleros y pimenteros	24
1.4	Molde para armazones de lentes para el sol	27

TABLA I.1

Número aproximado de piezas en productos	
Lápiz	4
Podadora de césped giratoria	300
Piano de cola	12 000
Automóvil	15 000
Boeing 747-400	6 000 000

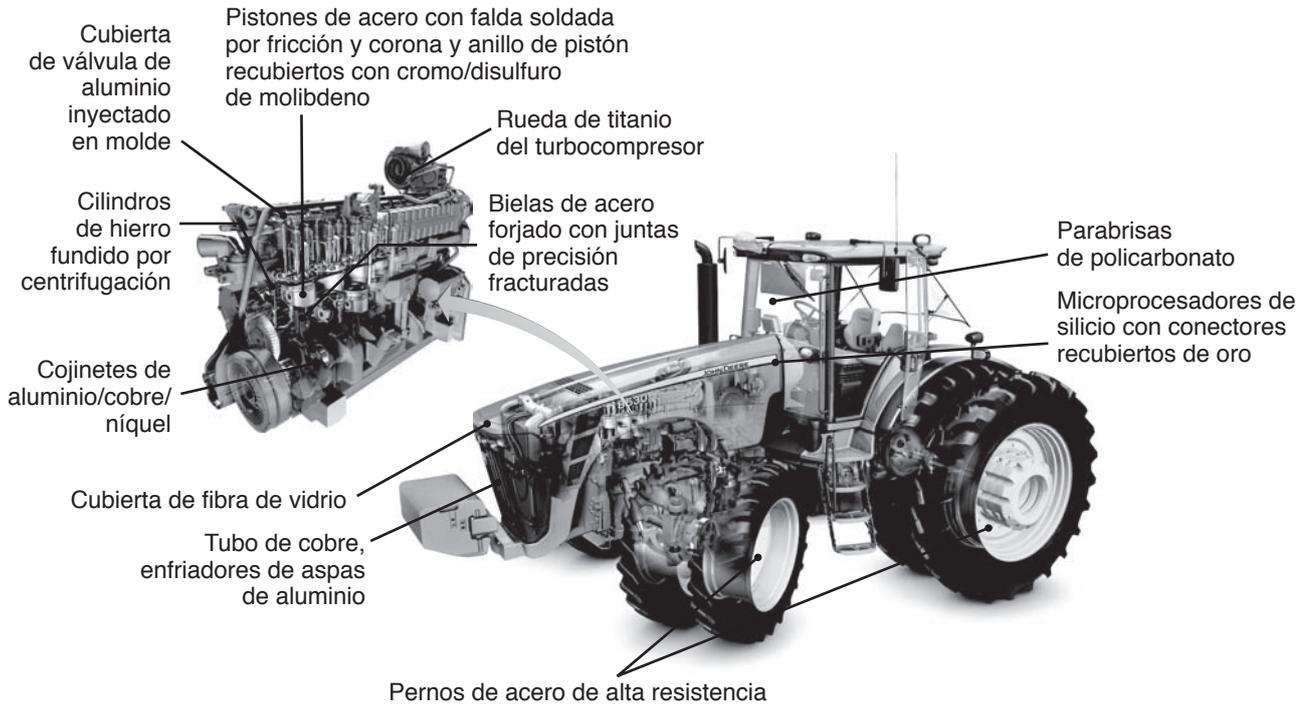


FIGURA I.1 Tractor John Deere modelo 8430, con ilustración detallada de su motor diesel, que muestra la variedad de materiales y procesos incorporados en su manufactura. *Fuente:* Cortesía de John Deere Company.

y después hornearlas, como vemos en la escritura cuneiforme y pictogramas del año 3000 a. C. y (c) herramientas simples para hacer incisiones y grabados en superficies de piedra, como en los jeroglíficos del antiguo Egipto.

La manufactura de artículos para usos específicos comenzó con la producción de diversos artefactos para el hogar hechos, por lo general, de madera, piedra o metal. Los materiales utilizados en la fabricación de los primeros utensilios y objetos ornamentales incluían el oro, cobre y hierro, seguidos por la plata, el plomo, estaño, bronce y latón. Los primeros métodos de procesamiento empleados involucraban principalmente *fundición* y *martillado* porque eran relativamente fáciles de realizar. A través de los siglos, estos procesos simples comenzaron gradualmente a convertirse en operaciones cada vez más complejas, a aumentar sus tasas de producción y a alcanzar niveles superiores de calidad en los productos. Por ejemplo, observe en la tabla I.2 que los tornos para mecanizar roscas de tornillo ya estaban disponibles durante el periodo de 1600 a 1700, pero no fue sino hasta unos tres siglos después que se desarrollaron máquinas roscadoras automáticas.

Aunque la fabricación de hierro comenzó en Medio Oriente aproximadamente en el año 1100 a. C., un hito importante fue la producción de acero en Asia durante el periodo comprendido entre 600 y 800 d. C. Entonces comenzó a desarrollarse de manera continua una amplia variedad de materiales. En la actualidad, se dispone de un sinnúmero de materiales metálicos y no metálicos con propiedades únicas, incluyendo los **materiales de ingeniería** y otros diversos materiales avanzados. Entre los materiales que ahora están disponibles se encuentran los cerámicos de alta tecnología o industriales, los plásticos reforzados, los materiales compósitos y los nanomateriales que se utilizan actualmente en una amplia variedad de productos, desde dispositivos para prótesis y computadoras hasta aviones supersónicos.

Hasta la **Revolución industrial** (también llamada la *Primera revolución industrial*), que comenzó en Inglaterra en la década de 1750, los bienes se producían en lotes, lo cual requería de una alta dependencia de la mano de obra en todas las fases de producción. La **Segunda revolución industrial** comenzó, de acuerdo con algunos estudiosos,

TABLA I.2

Desarrollo histórico de materiales, herramientas y procesos de manufactura						
Periodo	Fechas	Metales y fundición	Diversos materiales y compósitos	Formado y otros procesos para dar forma	Uniones	Herramientas, maquinado y sistemas de manufactura
Grecia: ~ 1100 a. C.-146 a. C.	~ 4000 a. C.	Oro, cobre, hierro de meteoritos.	Barro, cristales, fibras naturales.	Martillado.		Herramientas de piedra, pedernal, madera, hueso, marfil, herramientas de compósitos.
	Egipto: ~ 3100 a. C. -300 a. C.	3000	Fundición de cobre, piedra y moldes metálicos, proceso de cera perdida, plata, plomo, estaño, bronce.	Estampado, joyería.	Soldadura (CuAu, CuPb, PbSn).	Corindón (alúmina, esmeril).
	2000	Fundición y estirado de bronce, hojas de oro.	Cuentas de vidrio, ruedas de cerámica, vasos de vidrio.	Alambre por corte de hojas metálicas.	Remachado, soldadura fuerte.	Fabricación de azadones, ejes martillados, herramientas para fabricación de hierro y carpintería.
Edad Media: ~ 476-1492	Imperio Romano: ~ 500 a. C.-476 d. C.	1000	Hierro fraguado, latón.			
	1 a. C.	Hierro fundido, acero fundido.	Prensado y soplado de vidrio.	Estampado de monedas.	Forjado de soldadura de hierro y acero, encolado.	Mejora de cinceles, sierras, limas, tornos para trabajar la madera.
	1 d. C.	Zinc, acero.	Vidrio veneciano.	Armaduras, acuñado, forja, espadas de acero.		Atacado químico de armaduras.
	1000	Altos hornos, metales de imprenta, fundición de campanas, peltre.	Vasos de cristal.	Trefilado, trabajos con oro y plata.		Papel de lija, sierra impulsada por molino de viento.
	1500	Hierro fundido para cañón, hojalata.	Placas de vidrio moldeadas, cristal de roca.	Hidráulica para metalurgia, molino de laminado para bandas de acuñación.		Torno manual para madera.
Renacimiento: 1400-1600	1600	Fundición en molde permanente, latón a partir de cobre y zinc metálico.	Porcelana.	Laminación (plomo, oro, plata), laminado de formas (plomo).		Mandrinado, torneado, torno para roscar, taladro de prensa.

TABLA I.2 (continuación)

Desarrollo histórico de materiales, herramientas y procesos de manufactura						
Periodo	Fechas	Metales y fundición	Diversos materiales y compósitos	Formado y otros procesos para dar forma	Uniones	Herramientas, maquinado y sistemas de manufactura
Primera revolución industrial: ~ 1780-1850	1700	Hierro fundido maleable, acero al crisol (barras y perfiles de hierro).		Extrusión (tubo de plomo), embutido profundo, laminado.		
	1800	Fundición centrífuga, proceso Bessemer, aluminio electrolítico, aceros base níquel, metales babbitt, acero galvanizado, metalurgia de polvos, acero al hogar abierto.	Vidrio para ventanas a partir de cilindro recortado, foco (o bombillas), vulcanización, procesamiento de caucho, poliéster, estireno, celuloide, extrusión de caucho, moldeado.	Martillo de vapor, laminado de acero, tubos sin costura, rolado de acero ferroviario, laminación continua, galvanoplastia.		Conformado, fresado, torno copiado para culatas, torno de torreta, máquina fresadora universal, piedra o rueda rectificadora vitrificada.
Primera Guerra Mundial	1900		Fabricación automática de botellas, baquelita, vidrio de borosilicato.	Rolado de tubos, extrusión en caliente.	Oxiacetileno; arco, resistencia eléctrica y soldadura de termita.	Torno engranado, máquina de tornillo automática, roscadora, herramientas de acero de alta velocidad, óxido de aluminio y carburo de silicio (sintético).
Segunda Guerra Mundial	1920	Inyección de metales.	Desarrollo de plásticos, fundición, moldeo, cloruro de polivinilo, acetato de celulosa, polietileno, fibras de vidrio.	Alambre de tungsteno a partir de polvo metálico.	Electrodos recubiertos.	Carburo de tungsteno, producción en masa, máquinas de transferencia.
Segunda revolución industrial: 1947-	1940	Proceso de cera perdida para piezas de ingeniería.	Acrílicos, caucho sintético, resinas epóxicas, vidrio fotosensible.	Extrusión (acero), recalcado, metales en polvo para piezas de ingeniería.	Soldadura por arco sumergido.	Recubrimientos de conversión de fosfato, control de la calidad total.
	1950	Molde de cerámica, hierro nodular, semiconductores, colada continua.	Acrilonitrilo-butadieno-estireno, siliconas, fluorocarbonos, poliuretano, vidrio flotado, vidrio templado, vitrocerámicos.	Extrusión en frío (acero), formado explosivo, procesamiento termomecánico.	Arco de gas metálico, arco de gas tungsteno y soldadura por electroescoria; soldadura de explosión.	Maquinado eléctrico y químico, control automático.

TABLA I.2

Desarrollo histórico de materiales, herramientas y procesos de manufactura						
Periodo	Fechas	Metales y fundición	Diversos materiales y compósitos	Formado y otros procesos para dar forma	Uniones	Herramientas, maquinado y sistemas de manufactura
Era espacial	1960-1970	Fundición a presión, álabes de turbina monocristalinas.	Acetales, policarbonato, formado de plásticos en frío, plásticos reforzados, devanado de filamentos.	Hidroformado, extrusión hidrostática, electroformado.	Soldadura por arco de plasma y por haz de electrones, unión adhesiva.	Carburo de titanio, diamantes sintéticos, control numérico, chip de circuito integrado.
	1970-1990	Grafito compactado, fundición al vacío, arena aglomerada orgánicamente, automatización del moldeo y vertido, solidificación rápida, compósitos de matriz metálica, metalmecánica semisólida, metales amorfos, aleaciones con memoria de forma (materiales inteligentes), simulación por computadora.	Adhesivos, materiales compósitos, semiconductores, fibras ópticas, cerámicos estructurales, materiales compósitos de matriz cerámica, plásticos biodegradables, polímeros conductores de electricidad.	Forjado de precisión, forjado isotérmico, formado superplástico, dados y matrices hechos mediante el diseño y la manufactura asistidos por computadora, forjado y manufactura de forma neta, simulación por computadora.	Haz láser, unión por difusión (combinada también con el formado superplástico), soldadura en superficie montada.	Nitruro de boro cúbico, herramientas recubiertas, torneado con diamante, maquinado de ultraprecisión, manufactura integrada por computadora, robots industriales, centros de maquinado y torneado, sistemas de manufactura flexible, tecnología de sensores, inspección automatizada, sistemas expertos, inteligencia artificial, simulación y optimización por computadora.
Era de la información	1990-2010	Refundido, diseño asistido por computadora para moldes y troqueles, fabricación rápida de herramientas, aceros TRIP y TWIP.	Materiales de nanofase, espumas metálicas, recubrimientos avanzados, superconductores de alta temperatura, cerámicos maquinables, carbono tipo diamante, nanotubos de carbono, grafeno.	Prototipado rápido, creación rápida de herramientas, fluidos de corte metálico amigables con el medio ambiente, manufactura digital.	Soldadura por fricción, soldaduras libres de plomo, soldadura a tope con láser (adaptada), tramos de placa metálica, adhesivos conductores de electricidad, soldadura por fricción lineal.	Fabricación micro y nano, LIGA (acrónimo alemán de un proceso que incluye litografía, galvanoplastia y moldeo), ataque en seco, unidades de motor lineal, redes neuronales artificiales, seis sigma, chips de computadora tridimensionales, maquinado por arco azul, litografía blanda.

a mediados del siglo xx con el desarrollo de dispositivos electrónicos transistorizados y las computadoras (tabla I.2). La **mecanización** se inició en Inglaterra y otros países de Europa básicamente con el desarrollo de maquinaria textil y máquinas herramientas para el corte de metal. Esta tecnología pronto se trasladó a Estados Unidos, donde continuó desarrollándose.

A principios de 1800 surgió un avance importante en la manufactura con el diseño, la producción y el uso de **partes intercambiables**, lo cual fue concebido por el fabricante e inventor E. Whitney (1765-1825). Antes de la introducción de piezas intercambiables se requerían muchos ajustes realizados manualmente porque no había dos partes que pudieran hacerse exactamente iguales. Por el contrario, ahora se da por sentado que un perno roto puede ser reemplazado fácilmente por otro de idénticas características y producido décadas después que el original. En poco tiempo esto fue seguido por otros desarrollos que dieron lugar a una gran cantidad de productos industriales y de consumo, sin los cuales hoy en día no podríamos concebir la existencia.

A partir de la década de 1940, en todos los aspectos de la manufactura se alcanzaron varios hitos, como puede observarse mediante un examen detallado de la tabla I.2. Note en especial los progresos que se han realizado durante el siglo xx en comparación con los alcanzados durante el periodo que comprende 40 siglos desde el año 4000 a. C. hasta el 1 a. C.

Por ejemplo, en el Imperio Romano (aproximadamente entre 500 a. C. y 476 d. C.) había fábricas para la producción en masa de artículos de vidrio; sin embargo, los métodos utilizados solían ser muy lentos y se requería mucha mano de obra para el manejo de las piezas y la operación de la maquinaria. Hoy en día los métodos de producción han avanzado hasta el punto de que (a) las latas de aluminio para bebidas se elaboran a tasas superiores a 500 por minuto, y el costo de fabricación de cada lata es de alrededor de cuatro centavos de dólar, (b) los orificios en lámina metálica se perforan a tasas de 800 por minuto y (c) los focos se hacen a velocidades de más de 2000 por minuto.

El periodo que abarca aproximadamente desde la década de 1940 hasta la de 1990 se caracterizó por la **producción en masa** y la expansión de los mercados **globales**. Inicialmente, Estados Unidos tenía una posición dominante, puesto que era la única nación desarrollada que tenía una infraestructura intacta después de la Segunda Guerra Mundial, SGM; sin embargo, esta ventaja se disipó hacia la década de 1960. La revolución de la **calidad** comenzó a cambiar la manufactura en las décadas de 1960 y 1970 y las computadoras programables se comenzaron a utilizar de manera amplia en la década de 1980.

Se considera que la era de la **manufactura digital** comenzó alrededor de 1990. Como un cambio fundamental en las operaciones de manufactura, ahora las computadoras y el *software* de gran alcance han estado integrándose plenamente en las empresas de diseño y manufactura. Los avances en las comunicaciones, algunos basados en internet, han dado lugar a nuevas mejoras en la organización y las capacidades. Los efectos son más notables cuando se considera el origen y la proliferación del prototipado rápido. Antes de 1990, el prototipo de una pieza sólo podía producirse a través de un esfuerzo intenso y enfoques de fabricación costosos, los cuales requerían una habilidad significativa del operario. Hoy en día, una pieza puede dibujarse primero en un programa CAD (siglas en inglés para diseño asistido por computadora) y después producirse en cuestión de minutos u horas (dependiendo del tamaño y complejidad de la pieza) sin necesidad de herramientas ni mano de obra especializadas. Con el tiempo, los sistemas de elaboración de prototipos se han vuelto más económicos y rápidos y utilizan materias primas mejoradas. El término *manufactura digital* se ha aplicado para reflejar la noción de que la fabricación de componentes puede llevarse a cabo de principio a fin utilizando CAD y maquinaria de producción dirigida por computadora.

1.2 Diseño del producto e ingeniería concurrente

El diseño del producto implica la prescripción creativa y sistemática de la forma y las características de un artefacto para lograr objetivos específicos al tiempo que se satisfacen varias restricciones. El diseño es una actividad crucial; se ha estimado que hasta 80% del costo

del desarrollo y la fabricación de un producto es determinado por las decisiones tomadas en las etapas *iniciales* de diseño. El proceso de diseño del producto se ha estudiado a profundidad; aquí se presenta en forma breve debido a las fuertes interacciones que existen entre las actividades de manufactura y diseño.

Los enfoques innovadores son esenciales para el éxito del diseño de producto, de igual modo que lo son las funciones especificadas con claridad y una declaración exacta del desempeño que se espera del producto. En esta etapa también debe definirse el mercado para el producto, que puede ser nuevo o una versión modificada de un producto existente, y su uso o usos previstos. Este aspecto también incluye la ayuda de los analistas de mercado y del personal de ventas que brindará información valiosa y oportuna al fabricante, especialmente en lo relacionado con las necesidades y tendencias del mercado.

El proceso de diseño. Tradicionalmente, las actividades de diseño y manufactura se han llevado a cabo *de manera secuencial*, como se muestra en la figura I.2a. En un primer momento, esta metodología puede parecer sencilla y lógica; sin embargo, en la práctica representa un desperdicio de recursos. Considere, por ejemplo, el caso de un ingeniero de manufactura que determina, por varias razones, que sería más deseable (a) utilizar un material diferente, como un polímero o un cerámico en vez de un metal, (b) usar el mismo material pero en una condición diferente, por ejemplo un material más blando en lugar de uno más duro o un material con un acabado superficial más liso, o (c) modificar el diseño de un componente con el fin de que su manufactura sea más fácil, más rápida y menos costosa. Observemos que estas decisiones deben llevarse a cabo en la sexta casilla de arriba hacia abajo en la figura I.2a.

Cada una de las modificaciones recién descritas requerirá una repetición de la etapa de análisis de diseño (la tercera casilla de arriba hacia abajo en la figura I.2a) y de las etapas posteriores. Este enfoque pretende asegurar que el producto seguirá cumpliendo con todos los requisitos especificados y funcionará satisfactoriamente. Un cambio posterior, por ejemplo en un componente forjado, fundido o maquinado, también requerirá una repetición del análisis. Resulta obvio que estas iteraciones desperdician el tiempo y los recursos de una empresa.

Ingeniería concurrente. Impulsada principalmente por la industria de los electrónicos de consumo, se ha presentado una tendencia continua a llevar los productos al mercado lo más rápidamente posible con el fin de obtener un mayor porcentaje de participación de mercado y, por lo tanto, mayores ganancias. Una metodología importante destinada a lograr este fin es la *ingeniería concurrente*, la cual implica el enfoque de desarrollo del producto mostrado en la figura I.2b.

Aunque este concepto, llamado también *ingeniería simultánea*, sigue teniendo la misma secuencia general de flujo del producto que el enfoque tradicional mostrado en la figura I.2a, ahora contiene varias modificaciones deliberadas. Desde las primeras etapas de diseño e ingeniería del producto, todas las disciplinas relevantes se consideran *simultáneamente*. Como resultado, cualquier iteración que deba hacerse requerirá menor esfuerzo, lo cual redundará en una menor cantidad de tiempo perdido que el que produce el enfoque de diseño tradicional. Debe ser evidente que un elemento crucial de este enfoque consiste en reconocer la importancia de la *comunicación* entre y dentro de todas las disciplinas pertinentes.

La ingeniería concurrente puede implementarse en empresas grandes o pequeñas, lo que es particularmente importante puesto que, por ejemplo, el 98% de las empresas manufactureras de Estados Unidos tiene menos de 500 empleados. Este tipo de negocios se conocen generalmente como *pequeñas empresas*. Como un ejemplo de los beneficios de la ingeniería concurrente, una empresa automotriz redujo 30% el número de componentes en uno de sus motores, disminuyó 25% el peso del motor y redujo en 50% su tiempo de fabricación.

Ciclo de vida. En la ingeniería concurrente, el diseño y la fabricación de productos se integran con la intención de optimizar todos los elementos que intervienen en el *ciclo de*

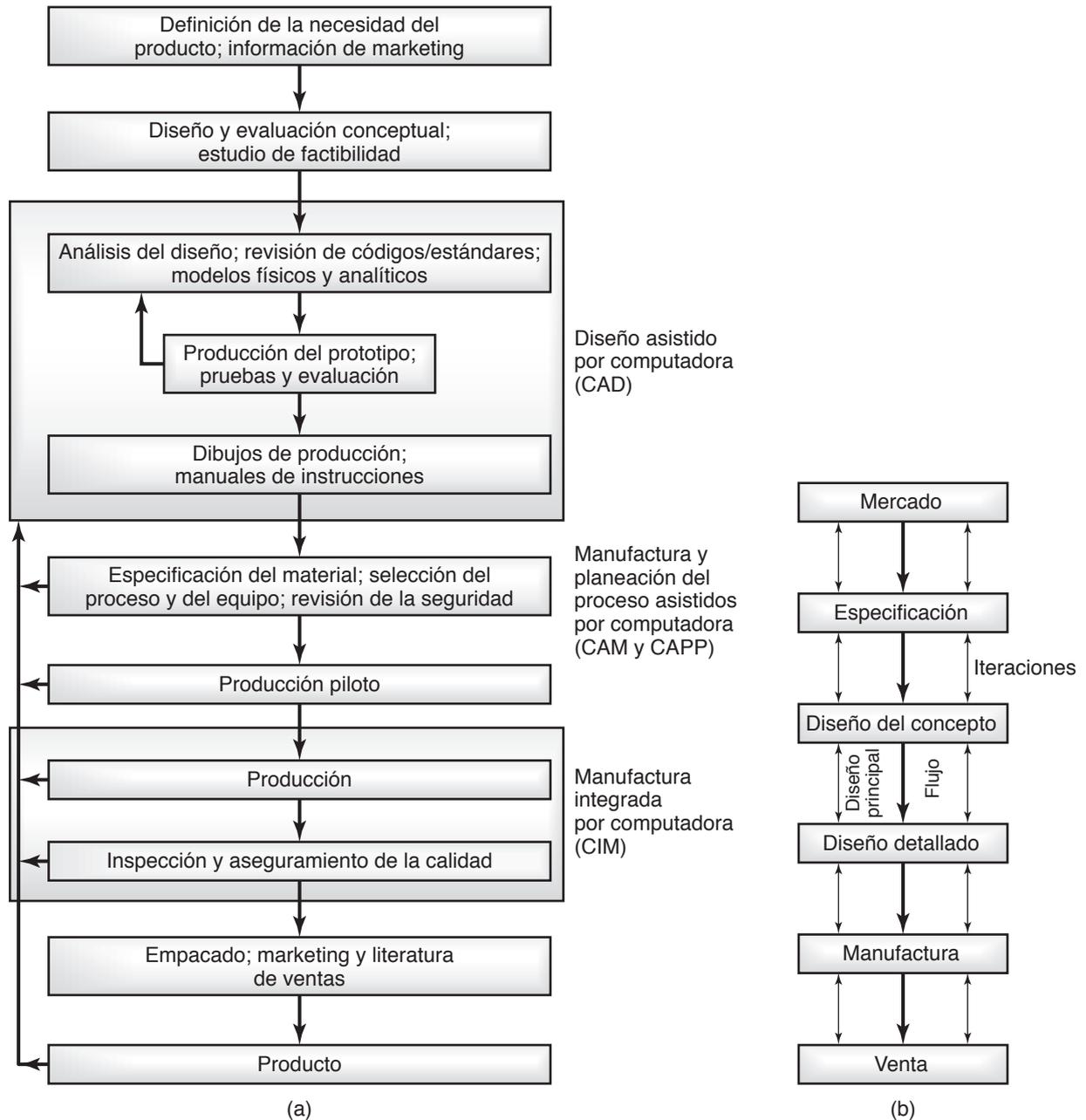


FIGURA I.2 (a) Gráfica que muestra las distintas etapas implicadas en el diseño y la manufactura *tradicionales* de un producto. Dependiendo de la complejidad del producto y del tipo de materiales utilizados, el lapso entre el concepto original y la comercialización del producto puede variar desde unos pocos meses hasta varios años. (b) Gráfica que muestra el flujo general del producto en la *ingeniería concurrente*, desde el análisis de mercado hasta la comercialización del producto. *Fuente:* Según S. Pugh.

vida del producto (vea la sección I.4). Por lo general, el ciclo de vida de un nuevo producto se compone de cuatro etapas:

1. Lanzamiento del producto.
2. Crecimiento rápido del producto en el mercado.
3. Madurez del producto.
4. Declive.

En consecuencia, la **ingeniería del ciclo de vida** requiere considerar *toda la vida* de un producto; iniciando con la fase de diseño, pasando por la producción, la distribución y el uso del producto, hasta llegar a su reciclaje o desecho.

Papel de las computadoras en el diseño del producto. Por lo general, el diseño del producto requiere primero la preparación de *modelos analíticos* y *físicos* del producto con el fin de realizar la visualización y el análisis de ingeniería. Aunque la necesidad de estos modelos depende de la complejidad del producto, su construcción y estudio se han simplificado mediante el uso de las técnicas de **diseño asistido por computadora** (CAD) y de **ingeniería asistida por computadora** (CAE).

Los sistemas CAD son capaces de realizar análisis rápidos y exhaustivos de los diseños, ya sea que se trate de un simple soporte para un estante o de un engranaje para estructuras grandes y complejas. Por ejemplo, el avión de pasajeros Boeing 777 fue diseñado completamente por computadoras, en un proceso conocido como **diseño sin papel**, con 2000 estaciones de trabajo vinculadas a ocho servidores de diseño. A diferencia de los diseños previos de aviones, para el 777 no se realizaron prototipos ni maquetas y se construyó y ensambló *directamente* a partir del software CAD/CAM desarrollado.

A través de la ingeniería asistida por computadora, el desempeño de las estructuras sometidas, por ejemplo, a cargas estáticas o fluctuantes o a gradientes de temperatura también se puede simular, analizar y probar rápidamente y con precisión. La información generada se almacena y puede recuperarse, visualizarse, imprimirse y transferirse en cualquier momento y a cualquier lugar dentro de la organización de una empresa. Las modificaciones de diseño se pueden hacer y optimizar en cualquier momento (como ocurre a menudo en la práctica de la ingeniería, especialmente en la producción de grandes estructuras tales como aviones) en forma directa y sencilla.

La **manufactura asistida por computadora** involucra todas las fases de la manufactura mediante la utilización y el procesamiento de una gran cantidad de información —recopilada y almacenada en la base de datos de la organización— sobre los materiales y procesos pertinentes. Las computadoras son de gran ayuda para organizar la información desarrollada y para realizar tareas como (a) la programación de máquinas de control numérico y robots para operaciones de ensamble y manejo de materiales, (b) el diseño de herramientas, troqueles, moldes, accesorios y dispositivos para sostener las piezas de trabajo y (c) el mantenimiento del control de la calidad durante toda la operación.

Con base en los modelos desarrollados y analizados detalladamente, los diseñadores de productos finalizan las características geométricas de cada uno de los componentes del producto, incluyendo la especificación de sus tolerancias dimensionales y las características del acabado superficial. Debido a que todos los componentes, independientemente de su tamaño, deben *ensamblarse* en algún momento en el producto final, las tolerancias dimensionales son una consideración importante en la manufactura. En efecto, las tolerancias dimensionales son igualmente importantes tanto para los productos pequeños como para las carrocerías de los automóviles o los fuselajes de los aviones. Los modelos desarrollados también permiten especificar las propiedades mecánicas y físicas necesarias, las cuales a su vez afectan la selección de materiales.

Prototipos. Un *prototipo* es un modelo físico de un componente individual o de un producto. Los prototipos se revisan cuidadosamente en busca de posibles modificaciones al diseño, a los materiales o a los métodos de producción originales. Una tecnología importante y en constante evolución es el **prototipado rápido**. En la actualidad, los diseñadores pueden hacer prototipos rápidamente y a bajo costo —usando varias tecnologías especializadas CAD/CAM— a partir de materiales metálicos o no metálicos, tales como plásticos y cerámicos.

El prototipado rápido puede reducir significativamente los costos y los tiempos asociados con el desarrollo de productos. Hoy en día, las técnicas de prototipado rápido han avanzado hasta un nivel tal que también pueden utilizarse para la producción económica de bajo volumen (en lotes que comúnmente incluyen menos de 100 unidades) de una gran variedad de piezas reales y funcionales que después pueden ensamblarse en los productos.

Prototipado virtual. El *prototipado virtual* es un método basado en software que utiliza gráficas avanzadas y entornos de realidad virtual para que los diseñadores puedan ver y examinar una pieza detalladamente. Esta tecnología, que también se conoce como **diseño basado en la simulación**, utiliza paquetes CAD para representar una pieza de tal forma que los diseñadores pueden observarla y evaluarla en un entorno virtual interactivo en tercera dimensión a medida que se va desarrollando. El prototipado virtual ha ido ganando importancia, sobre todo debido a la disponibilidad de computadoras y herramientas de simulación y análisis a bajo costo.

I.3 Diseño para manufactura, ensamble, desensamble y servicio

El **diseño para la manufactura** (DFM, por sus siglas en inglés) es un enfoque *completo* para integrar el proceso de diseño con los métodos de producción, los materiales, la planeación de procesos, las pruebas, el ensamble y el aseguramiento de la calidad. El DFM requiere una comprensión fundamental de (a) las características y capacidades de los materiales, los procesos de fabricación, la maquinaria, los equipos y las herramientas, así como (b) de la variabilidad en el rendimiento de las máquinas, la precisión dimensional y el acabado superficial de la pieza de trabajo, el tiempo de procesamiento y el efecto de los métodos de procesamiento empleados sobre la calidad del producto. El establecimiento de relaciones *cuantitativas* resulta esencial con el fin de tener la capacidad de analizar y optimizar un diseño que facilite la manufactura y el ensamble al menor costo.

Los conceptos del **diseño para el ensamble** (DFA, por sus siglas en inglés), del **diseño para la manufactura y el ensamble** (DFMA, por sus siglas en inglés) y del **diseño para el desensamble** (DFD, por sus siglas en inglés) son consideraciones importantes en la manufactura. Existen metodologías y software para el diseño para el ensamble que utilizan diseños conceptuales en tercera dimensión y modelos sólidos. Ahora es posible minimizar los tiempos y costos del subensamble, ensamble y desensamble al tiempo que se mantiene la integridad y el desempeño del producto. La experiencia ha indicado que un producto que es fácil de ensamblar también es, por lo general, fácil de desensamblar.

El *ensamble* es una fase importante de la manufactura y requiere considerar la facilidad, la velocidad y el costo de reunir los numerosos componentes individuales de un producto (figura I.3). Dependiendo del tipo de producto, en la manufactura los costos de ensamble pueden ser sustanciales, suelen ubicarse entre 10 y 60% del costo total del producto. El *desensamble* de un producto es un factor igualmente importante para actividades tales como el mantenimiento, la reparación y el reciclaje de los componentes individuales.

Existen varios métodos para realizar el ensamble de componentes, incluyendo el uso de una amplia variedad de sujetadores, adhesivos o técnicas de unión tales como soldadura, soldadura fuerte o soldadura blanda. Como ocurre en todos los tipos de manufactura, cada una de estas operaciones de ensamble tiene sus propias características específicas, tiempos, ventajas y limitaciones, costos asociados y consideraciones especiales de diseño. Las piezas individuales pueden ensamblarse a mano o mediante una variedad de equipos automáticos y robots industriales. La elección depende de diversos factores como la complejidad del producto, el número de componentes que se ensamblarán, el cuidado y la protección que se necesitan para evitar daños en las partes individuales y el costo relativo de la mano de obra en comparación con el costo de la maquinaria requerida para realizar un ensamble automatizado.

Diseño para el servicio. Además de diseñar para el ensamble y el desensamble, *diseñar para el servicio* es un aspecto importante del diseño del producto. Con frecuencia, los productos tienen que desensamblarse en diversos grados con el fin de darles servicio y, si es necesario, repararlos. El diseño debe tener en cuenta el concepto de que, por facilidad de acceso, los componentes que tienen más probabilidades de requerir un servicio deben colocarse, tanto como sea posible, en las capas externas del producto. Esta metodología será apreciada por cualquiera que haya tenido la experiencia de dar mantenimiento a máquinas.

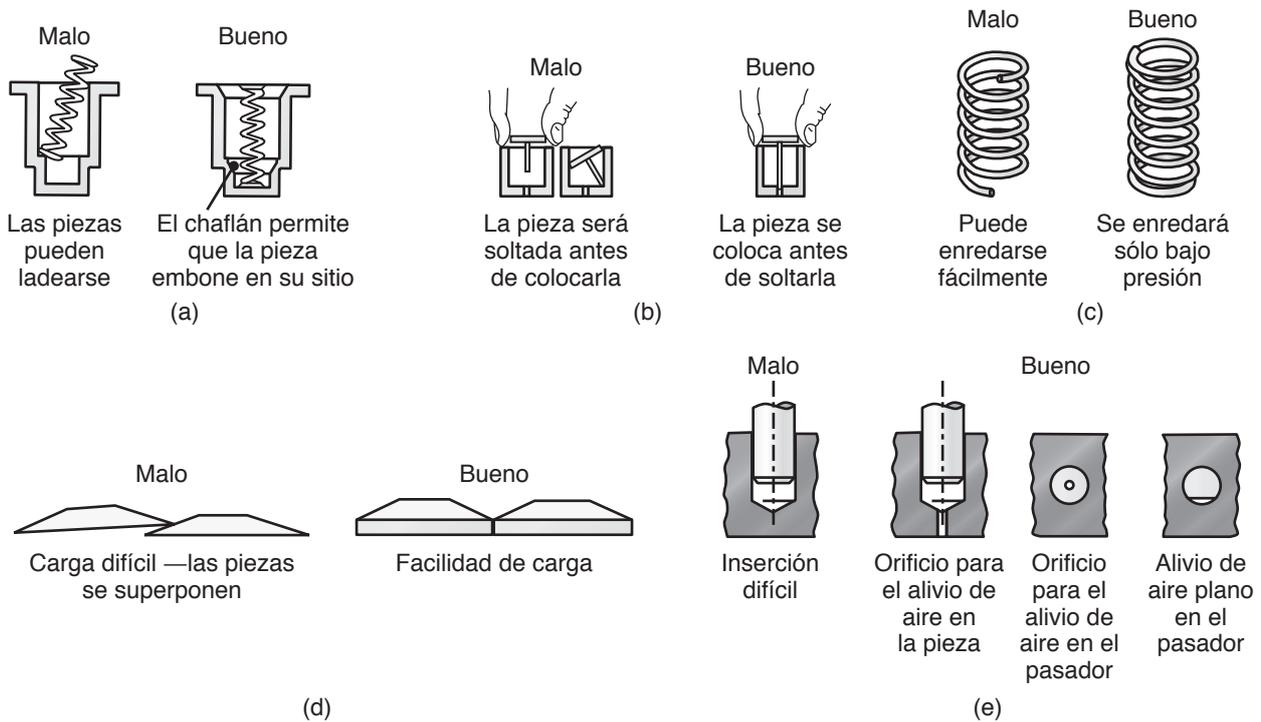


FIGURA I.3 Rediseño de piezas para facilitar el ensamblaje. Fuente: Según G. Boothroyd y P. Dewhurst.

I.4 Diseño y manufactura verdes

Sólo en Estados Unidos, 9 millones de vehículos de pasajeros, 300 millones de neumáticos, 670 millones de lámparas fluorescentes compactas y más de 5000 millones de kilogramos de productos de plástico se desechan cada año. Cada 3 meses, las industrias y los consumidores desechan suficiente aluminio como para reconstruir la flota aérea comercial de Estados Unidos. Tenga en cuenta que, como se indica a continuación, el término *chatarra* sugiere que el producto ha llegado al final de su vida útil; esto no necesariamente significa que tiene que depositarse en vertederos.

Tanto el proceso de manufactura como la operación de maquinaria pueden tener un impacto ambiental significativo. Por lo general, las operaciones de manufactura producen algunos desperdicios como:

1. Rebabas procedentes del maquinado y de los materiales recortados en las operaciones de formado de hojas metálicas, fundición y moldeo.
2. Escorias procedentes de las operaciones de fundición y soldadura.
3. Aditivos utilizados en las operaciones de fundición en arena.
4. Residuos peligrosos y materiales tóxicos que se utilizan en diversos productos.
5. Lubricantes y refrigerantes utilizados en las operaciones metalúrgicas y de maquinado.
6. Líquidos sobrantes de procesos como el tratamiento térmico y el contrachapado.
7. Solventes utilizados en operaciones de limpieza.
8. Humo y contaminantes provenientes de hornos y gases por quema de combustibles fósiles.

Los efectos adversos de estas actividades, el daño a nuestro medio ambiente y a los ecosistemas de la Tierra y, en última instancia, su efecto sobre la calidad de la vida humana son ampliamente reconocidos y apreciados. Las principales preocupaciones incluyen el calentamiento global, los gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano y óxido nitroso), la lluvia ácida, el agotamiento del ozono, los desechos peligrosos, la con-

taminación del agua y del aire y la filtración de contaminantes en las fuentes de agua. Una medida del impacto adverso de las actividades humanas es la conocida como **huella de carbono**, la cual cuantifica la cantidad de gases de efecto invernadero producidos en nuestras actividades diarias. En 2011, la cantidad de dióxido de carbono liberado a la atmósfera en todo el mundo se estimó en 2.4 millones de libras por segundo, siendo China el mayor contaminador.

El término **diseño y manufactura verdes** se ha vuelto común en todas las actividades industriales, con un gran énfasis en el **diseño para el medio ambiente** (DFE, por sus siglas en inglés). También se le llama **diseño y manufactura con conciencia ambiental** y este enfoque considera todos los posibles impactos adversos en el medio ambiente a partir de los materiales, procesos, operaciones y productos, de manera que todos éstos se tienen en cuenta en las primeras etapas de diseño y producción.

Estos objetivos de diseño y manufactura verdes, que se han convertido en globales, también han dado lugar al concepto de **diseño para el reciclaje** (DFR, por sus siglas en inglés). El reciclaje puede implicar una de dos actividades básicas:

- **Ciclo biológico:** Los materiales orgánicos se degradan de forma natural y, en la versión más simple de un ciclo biológico, conducen a la formación de nuevo suelo que puede sustentar la vida; por lo tanto, el diseño del producto suele implicar el uso de materiales orgánicos. Los productos funcionan bien durante su vida prevista y después pueden desecharse con seguridad.
- **Ciclo industrial:** Los materiales que conforman el producto se reciclan y reutilizan de manera continua; por ejemplo, las latas de aluminio para bebidas se reciclan y el metal se vuelve a utilizar. Para demostrar los beneficios económicos de este enfoque, se ha estimado que la producción de aluminio obtenida a partir de desechos, en vez de basarse en el mineral de bauxita, reduce hasta 66% los costos de producción y disminuye más de 90% el consumo de energía y la contaminación.

Uno de los principios básicos del diseño para el reciclaje es el uso de materiales y características de diseño en los productos que faciliten el reciclaje biológico o industrial. Por ejemplo, en la industria automotriz estadounidense actualmente se recicla alrededor de 75% de las piezas de automóvil (sobre todo metálicas) y existen planes para reciclar el porcentaje restante, que incluye plásticos, vidrio, caucho y espuma. Alrededor de 80% de los neumáticos de automóviles desechados se reutilizan en diversas formas.

Producción de la cuna a la cuna. También llamada C2C, la producción *de la cuna a la cuna* considera el impacto de cada etapa del ciclo de vida del producto, desde el momento en que los recursos naturales se extraen y procesan para formar materias primas, pasando por cada etapa de la manufactura de los productos hasta su uso y, por último, su reciclaje. La producción *de la cuna a la tumba*, también llamada producción *del vientre a la tumba*, tiene un enfoque similar, pero no necesariamente considera o asume la responsabilidad del reciclaje.

La producción de la cuna a la cuna enfatiza en especial lo siguiente:

1. Actividades de manufactura sustentables y eficientes que utilizan tecnologías limpias.
2. Producción sin desperdicios.
3. Uso de materiales reciclables y no peligrosos.
4. Reducción del consumo de energía.
5. Uso de energías renovables como la eólica y la solar.
6. Conservación de los ecosistemas reduciendo al mínimo el impacto ambiental de todas las actividades de manufactura.
7. Uso de materiales y fuentes de energía disponibles a nivel local para reducir el consumo de energía asociado con su transporte que, por lo general, tiene una huella de carbono inherentemente alta.
8. Exploración continua de la reutilización y el reciclaje de materiales buscando en forma constante su recirculación; también incluye la investigación del compostaje de materiales, siempre que sea apropiado o necesario, en vez de depositarlos en vertederos.

Directrices para el diseño y la manufactura verdes. En la revisión de las diversas actividades descritas hasta el momento, se puede observar que existen relaciones generales entre los conceptos básicos de DFMA, DFD, DFE y DFR. Estas relaciones pueden resumirse en directrices que ahora están siendo rápidamente aceptadas en todo el mundo:

1. Reducir el desperdicio de materiales mediante la refinación del diseño del producto, la reducción de la cantidad de materiales utilizados en los productos y la selección de procesos de fabricación que minimicen los residuos (como el formado en lugar del maquinado).
2. Reducir el uso de materiales peligrosos en los productos y procesos.
3. Investigar sobre las tecnologías de manufactura que generen productos y subproductos seguros y respetuosos con el medio ambiente.
4. Realizar mejoras en los métodos de reciclaje, tratamiento de residuos y reutilización de materiales.
5. Minimizar el consumo de energía y, siempre que sea posible, fomentar la utilización de fuentes de energía renovables; la selección de materiales puede tener un impacto importante sobre la energía latente en los productos.
6. Fomentar el reciclaje mediante el uso de materiales que formen parte de los ciclos industrial o biológico, pero no ambos en el mismo ensamble de producto. Garantizar el manejo correcto y la eliminación apropiada de todos los residuos de los materiales que se utilizan en los productos y que no sean compatibles con los ciclos industrial o biológico.

I.5 Selección de materiales

En la actualidad, se dispone de una variedad cada vez más amplia de materiales donde cada tipo tiene sus propiedades específicas y características de manufactura particulares, ventajas y limitaciones, al igual que sus propios costos. La selección de materiales para los productos (de consumo o industriales) y sus componentes suele hacerse con el apoyo de los ingenieros de materiales, aunque los ingenieros de diseño también pueden tener una experiencia suficiente y calificada para hacerlo.

Los tipos generales de materiales utilizados, ya sea individualmente o en combinación con otros, son los siguientes:

- **Metales ferrosos:** carbono, aleaciones, acero inoxidable y aceros para herramientas, dados y matrices (capítulo 5).
- **Metales no ferrosos:** aluminio, magnesio, cobre, níquel, titanio, superaleaciones, metales refractarios, berilio, aleaciones de circonio, aleaciones de bajo punto de fusión y metales preciosos (capítulo 6).
- **Plásticos (polímeros):** termoplásticos, termofijos y elastómeros (capítulo 7).
- **Cerámicos, vidrios, vitrocerámicos, grafito, diamante y materiales tipo diamante** (capítulo 8).
- **Materiales compuestos:** plásticos reforzados y compósitos de matriz metálica y de matriz cerámica (capítulo 9).
- **Nanomateriales** (sección 8.8).
- **Aleaciones con memoria de forma** (*materiales inteligentes*), **aleaciones amorfas, semiconductores y superconductores** (capítulos 6 y 18).

A medida que se presentan nuevos desarrollos, la selección de un material apropiado para una aplicación particular, a partir de una variedad muy amplia de alternativas, se ha vuelto un reto cada vez mayor. Por otra parte, existen tendencias hacia la sustitución de materiales que cambian en forma continua impulsadas no sólo por consideraciones tecnológicas sino también por la economía.

Propiedades de los materiales. Por lo general, las *propiedades mecánicas* que son de interés en la manufactura incluyen resistencia, ductilidad, dureza, tenacidad, elasticidad,

fatiga y resistencia a la termofluencia (capítulo 2). Las *propiedades físicas* son la densidad, el calor específico, la dilatación térmica y la conductividad, el punto de fusión y las propiedades eléctricas y magnéticas (capítulo 3). A menudo, los diseños óptimos requieren la consideración de una combinación de propiedades mecánicas y físicas. Dos ejemplos típicos son la razón de *fuerza a peso* y de *rigidez a peso* de los materiales para reducir al mínimo el peso de los elementos estructurales; la reducción del peso es particularmente importante para las aplicaciones aeroespaciales y automotrices con el fin de mejorar el desempeño y la economía de combustible.

Las *propiedades químicas* incluyen la oxidación, corrosión, degradación, toxicidad e inflamabilidad; estas propiedades juegan un papel significativo en entornos tanto hostiles (por ejemplo corrosivos) como normales. Las *propiedades de manufactura* indican si un material particular se puede fundir, formar, maquinarse, unir y tratar térmicamente con relativa facilidad. Como lo ilustra la tabla I.3, ningún material tiene las mismas características de manufactura. Otra consideración es la *apariencia*, la cual incluye características tales como la textura superficial, el color y la sensación, cualidades que pueden jugar un papel importante en la aceptación de un producto por parte del público.

Disponibilidad. Como se enfatiza en este libro, el aspecto económico de la selección de materiales es tan importante como las consideraciones tecnológicas (capítulo 40), por ello la disponibilidad de los materiales es una preocupación fundamental en el sector manufacturero. Por otra parte, si los materiales no están disponibles en las formas, dimensiones, texturas superficiales y cantidades deseadas, puede ser necesario sustituirlos o realizar un procesamiento adicional de algún material en particular, lo cual puede contribuir significativamente al aumento de los costos de producción.

La *confiabilidad de suministro* es importante para cumplir con los programas de producción; en la industria automotriz, por ejemplo, los materiales deben llegar a una planta a intervalos apropiados. (Vea también *justo a tiempo* en la sección I.7). La confiabilidad de suministro también es importante porque la mayoría de los países importan numerosas materias primas. Por ejemplo, Estados Unidos importa la mayor parte del cobalto, titanio, cromo, aluminio, níquel, caucho natural y diamante que necesita. Por lo tanto, la autosuficiencia de un país sobre los recursos, especialmente sobre la energía, es un objetivo político que se expresa con frecuencia pero que resulta muy difícil de lograr. De modo que la *geopolítica* (definida de manera breve como el estudio de la influencia de la geografía física de una nación en su política exterior) también debe tenerse en cuenta, particularmente durante periodos de inestabilidad y hostilidad globales.

Vida de servicio. Todo mundo ha experimentado alguna vez en forma directa una vida útil de un producto que ha sido más corta de lo previsto, y las causas pueden ser una o más de las siguientes: (a) selección inadecuada de materiales, (b) selección inadecuada de los métodos de producción, (c) control insuficiente de las variables de procesamiento,

TABLA I.3

Características generales de manufactura de diversos materiales

Aleación	Colabilidad	Soldabilidad	Maquinabilidad
Aluminio	Excelente	Aceptable	Excelente-buena
Cobre	Buena-aceptable	Aceptable	Buena-aceptable
Hierro fundido gris	Excelente	Difícil	Buena
Hierro fundido blanco	Buena	Muy mala	Muy mala
Níquel	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Aceros	Aceptable	Excelente	Aceptable
Zinc	Excelente	Difícil	Excelente

Las evaluaciones mostradas dependen en gran medida del material particular, de sus aleaciones y su historial de procesamiento.

(d) materias primas o piezas defectuosas, o defectos inducidos por la manufactura, (e) falta de mantenimiento de la maquinaria o el equipo y (f) uso indebido del producto.

En general, se considera que un producto ha fallado cuando:

- Deja de funcionar debido a la falla de uno o más de sus componentes como, por ejemplo, un eje, un engranaje, un perno o aspa de turbina rotores o un motor eléctrico quemado.
- No funciona correctamente o no se desempeña dentro de las especificaciones requeridas debido, por ejemplo, a engranajes o cojinetes desgastados.
- Su uso se vuelve poco confiable o inseguro, como en el caso del comportamiento errático de un interruptor, de las malas conexiones en una tarjeta de circuitos impresos o de la delaminación de un material compuesto.

Sustitución de materiales en los productos. Existen muchas sustituciones de materiales que se realizan por una variedad de razones, como lo evidencia una inspección de rutina y una comparación de productos comunes tales como electrodomésticos, equipos deportivos o automóviles. Como una medida de los desafíos que deben enfrentarse en la sustitución de materiales, considere los siguientes ejemplos: (a) mango de metal contra el de madera en un martillo, (b) silla de jardín de aluminio contra la de hierro fundido, (c) cables eléctricos de cobre contra los de aluminio, (d) defensas de plástico contra las de acero y (e) casco submarino de aleación de acero contra el de aleación de titanio.

Los siguientes dos casos de estudio describen algunos detalles de los principales factores que intervienen en la sustitución de materiales en los productos comunes (ordinarios).

CASO DE ESTUDIO I.1 Bates de béisbol

Por lo general, en Estados Unidos los bates de béisbol de las ligas mayores y menores se hacen de madera de fresno blanco del norte, un material que tiene alta estabilidad dimensional, alto módulo de elasticidad y alta relación resistencia a peso, así como alta resistencia a los impactos. Sin embargo, los bates de madera se rompen y pueden causar lesiones graves. (Esto resulta especialmente cierto con la nueva tendencia de utilizar madera de arce en los bates de béisbol). Los bates de madera se fabrican en tornos semiautomáticos (sección 23.3), etapa seguida por operaciones de acabado para darles la apariencia final y etiquetarlos. El grano uniforme recto requerido para estos bates se ha vuelto cada vez más difícil de encontrar, en particular porque la mejor madera procede de árboles de fresno que tienen al menos 45 años de edad.

Desde la década de 1970 se han fabricado bates de aluminio (parte superior de la figura I.4) para el mercado amateur y para los jugadores de escuelas y universidades como una alternativa económica a la madera. Estos bates se manufacturan mediante diversas operaciones metalúrgicas, las cuales se describen a lo largo de la parte III de este libro. Aunque al principio su desempeño no era tan bueno como el de los bates de madera, la tecnología ha avanzado mucho. Ahora, casi todos los bates de metal se hacen con tubería de aluminio de alta resistencia, aunque pueden incorporar titanio. Los bates están diseñados para tener el mismo centro de percusión



FIGURA I.4 Secciones transversales de bates de béisbol de aluminio (las dos de la parte superior) y de material compuesto (las dos de la parte inferior).

(continúa)

(conocido como punto dulce, igual que en las raquetas de tenis) que los bates de madera y, por lo general, se rellenan de poliuretano o corcho para darles mejor amortiguación del sonido y controlar el equilibrio del bate.

Los bates de metal poseen características de desempeño deseables como un peso más bajo que los bates de madera, una distribución óptima del peso a lo largo de su longitud y una dinámica de impacto superior. Además, como se ha documentado en estudios científicos, hay un consenso general acerca de que los bates de metal superan a los de madera. Otros desa-

rollos en el material de los bates incluyen materiales compósitos (capítulo 9), los cuales constan de fibras de grafito de alta resistencia o de fibras de vidrio incrustadas en una matriz de resina epóxica. El tejido interior del mango (parte inferior de la figura I.4) está hecho a partir de fibras de Kevlar (una aramida), las cuales añaden fuerza al bate y amortiguan las vibraciones; con estos bates se logra un sonido parecido al de los bates de madera.

Fuente: Mizuno USA, Inc.

CASO DE ESTUDIO I.2 Centavos estadounidenses

La Casa de Moneda de Estados Unidos produce y pone en circulación miles de millones de monedas de un centavo cada año. Los materiales utilizados han experimentado cambios significativos a lo largo de su historia, en gran parte debido a la escasez periódica de materiales y a la consecuente fluctuación del costo de los materiales más adecuados. La tabla siguiente muestra la evolución cronológica de las sustituciones de material realizadas en las monedas de un centavo:

1793-1837	100% cobre
1837-1857	95% cobre, 5% estaño y zinc
1857-1863	88% cobre, 12% níquel
1864-1962	95% cobre, 5% estaño y zinc
1943 (años de la SGM)	Acero con revestimiento de zinc
1962-1982	95% cobre, 5% zinc
1982 al presente	97.5% zinc revestido con cobre

I.6 Selección de procesos de manufactura

A menudo existe más de un método que puede emplearse para producir un componente de un producto con un material dado. Las siguientes categorías generales de métodos de manufactura son aplicables a materiales metálicos tanto como a no metálicos:

1. Fundición (figura I.5a): con molde desechable y molde permanente (parte II).
2. Formado y otros procesos para dar forma (figuras I.5b, c y d): laminado, forjado, extrusión, trefilado, formado de láminas, metalurgia de polvos y moldeo (parte III).
3. Maquinado (figura I.5e): torneado, mandrinado, taladrado, fresado, cepillado, escariado; esmerilado; maquinado ultrasónico; maquinado químico, eléctrico y electroquímico y maquinado por haz de alta energía (parte IV); esta amplia categoría también incluye el micromaquinado para la producción de piezas de ultraprecisión (parte V).
4. Uniones (figura I.5f): soldadura, soldadura fuerte, soldadura blanda, unión por difusión, pegado adhesivo y sujeción mecánica (parte VI).
5. Acabado: joneado (también honeado o asentado), lepeado, pulido, bruñido, desbarbado, tratamiento de superficies, recubrimiento y revestimiento (capítulos 26 y 34).
6. Microfabricación y nanofabricación: tecnologías que son capaces de producir piezas con dimensiones en los niveles micro (la millonésima parte de un metro) y nano (la milmillonésima parte de un metro); fabricación de sistemas microelectromecánicos (MEMS) y sistemas nanoelectromecánicos (NEMS), los cuales comúnmente implican procesos tales como la litografía, el micromaquinado superficial y volumétrico y el ataque químico.

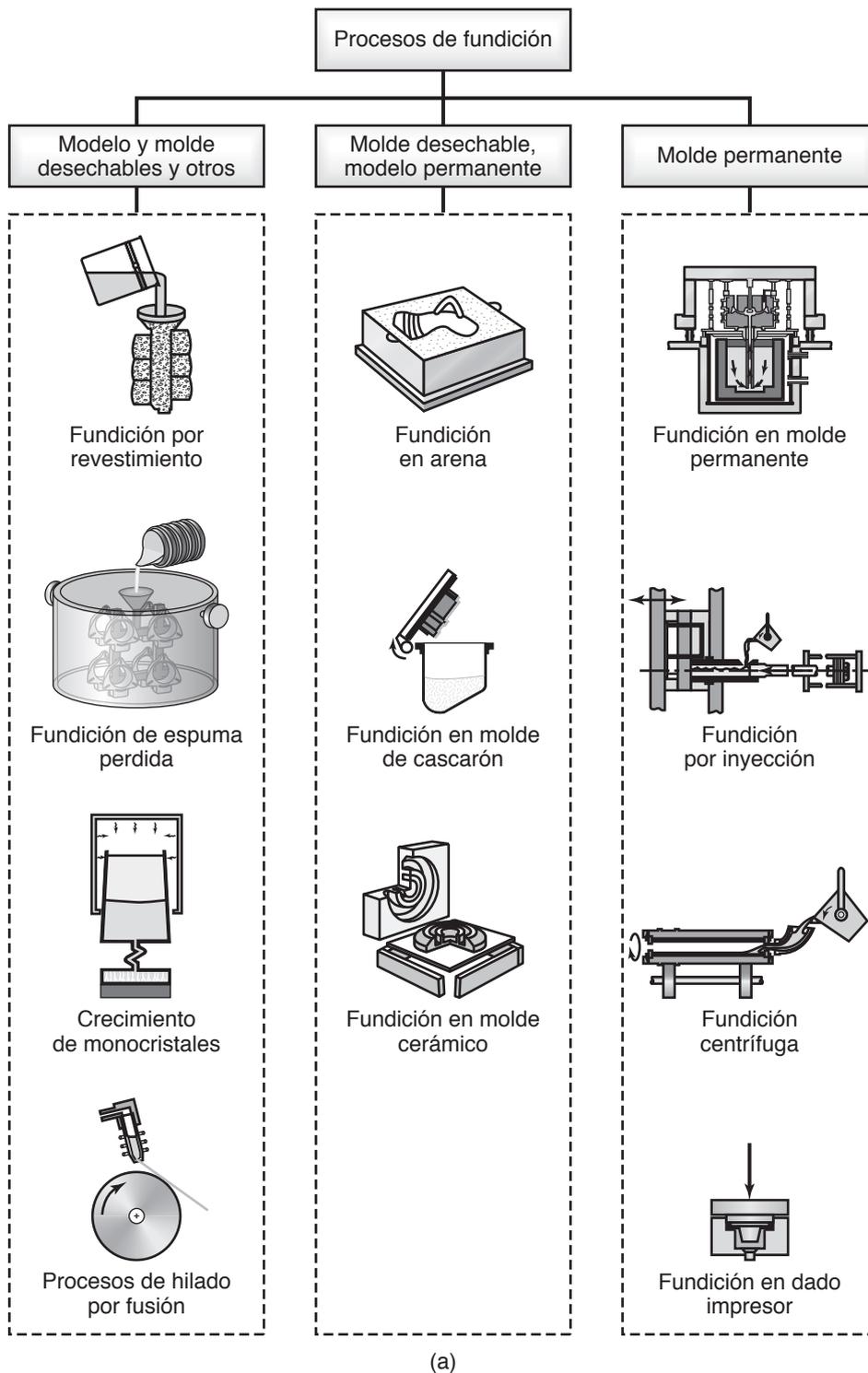


FIGURA I.5a Ilustraciones esquemáticas de diversos procesos de fundición.

Selección del proceso. La selección de un proceso o, más a menudo, de una secuencia de procesos de manufactura en particular, depende de las características geométricas de las piezas a ser producidas, incluyendo las tolerancias dimensionales y la textura superficial requeridas, así como de numerosos factores relacionados con el material de la pieza especí-

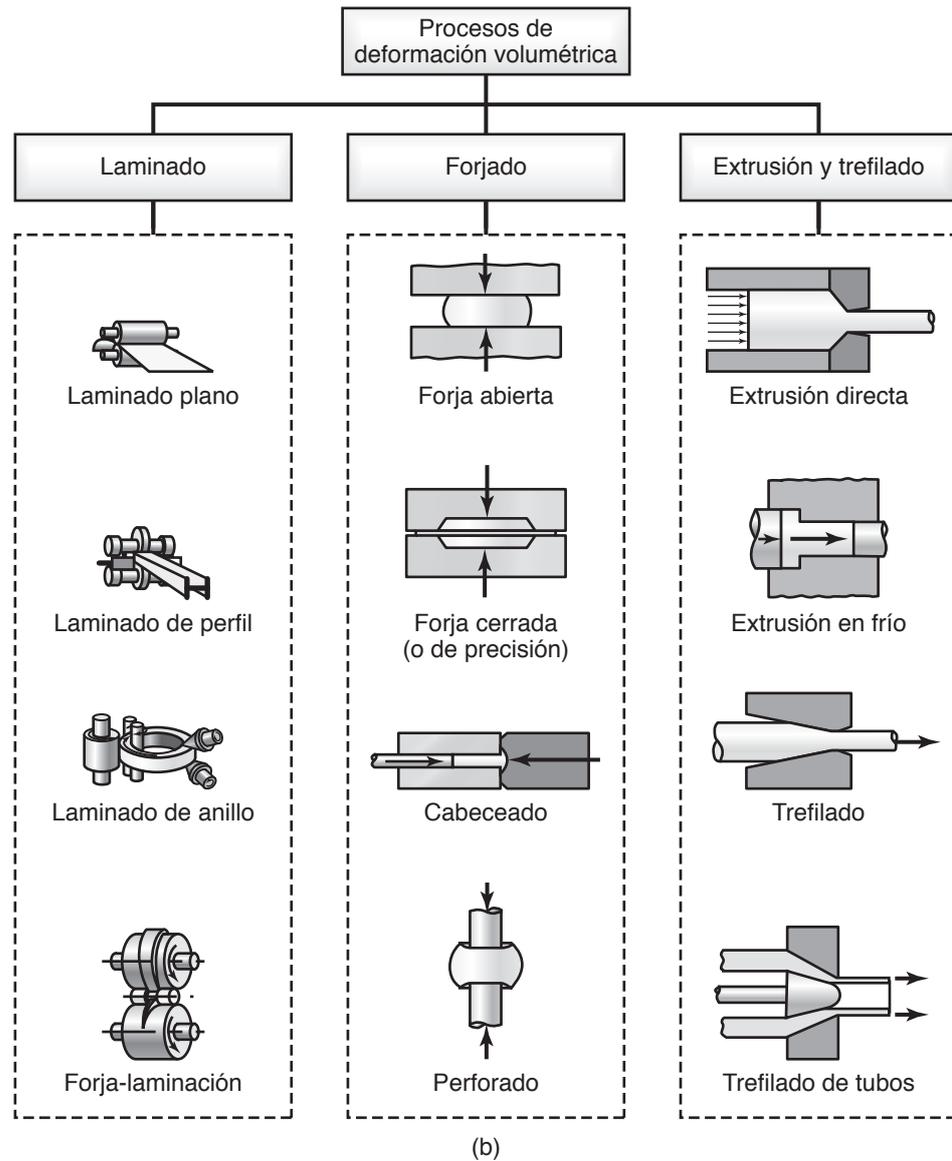


FIGURA 1.5b Ilustraciones esquemáticas de diversos procesos de deformación volumétrica.

fica y sus propiedades de manufactura. Para enfatizar los desafíos de esta etapa, considere los siguientes dos casos:

1. Los materiales frágiles y duros no pueden formarse o perfilarse sin el riesgo de fractura, a menos que estos procesos se realicen a temperaturas elevadas; por otra parte, estos materiales pueden fundirse, maquinarse o esmerilarse con relativa facilidad.
2. Los metales que han sido preformados a temperatura ambiente se vuelven menos formables durante el procesamiento posterior, el cual suele ser necesario en la práctica para dar acabado a la pieza; lo anterior se debe a que los metales se vuelven más resistentes, más duros y menos dúctiles de lo que eran antes de su procesamiento.

Existe una demanda constante de nuevos enfoques para enfrentar los problemas de producción y, sobre todo, para la reducción de costos de manufactura; por ejemplo, las piezas de lámina metálica han sido tradicionalmente cortadas y fabricadas utilizando herramientas mecánicas comunes, como punzones y troqueles. Así, aunque todavía se utilizan ampliamente, algunas de estas operaciones se han sustituido por corte con láser, como se

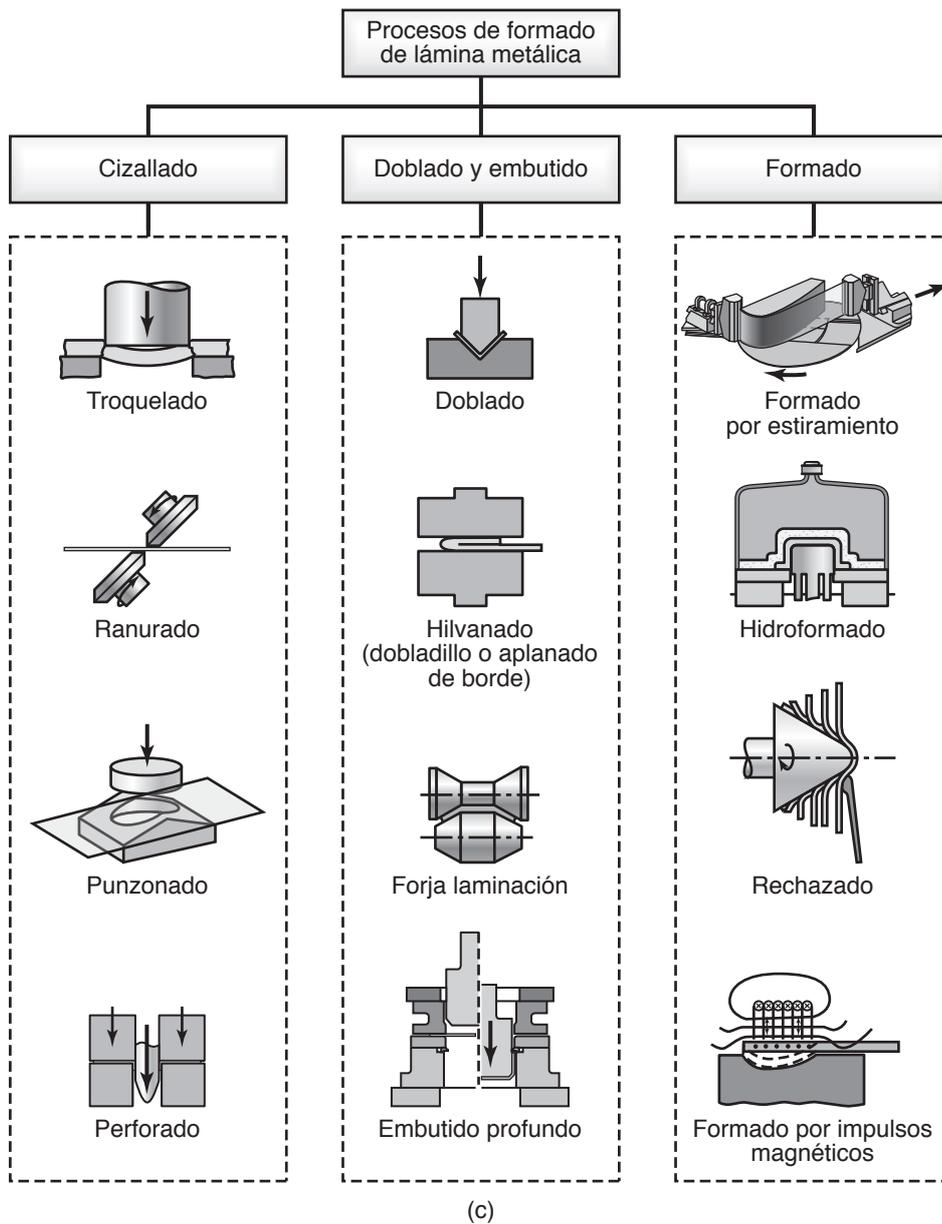


FIGURA I.5c Ilustraciones esquemáticas de varios procesos empleados para el formado de lámina metálica.

muestra en la figura I.6. Este método elimina la necesidad de emplear herramientas duros que normalmente tienen sólo formas fijas, pueden ser costosas y su fabricación consume mucho tiempo.

En esta operación de corte, la trayectoria del láser se controla por computadora, lo que aumenta la flexibilidad de la operación y su capacidad de producir una infinita variedad de perfiles de manera precisa, repetible y económica. Por otro lado, debido a las altas temperaturas que implica el uso de láser, las superficies producidas después del corte tienen características muy diferentes (por ejemplo, textura superficial y decoloración) a las producidas mediante los métodos tradicionales. Esta diferencia puede tener efectos adversos significativos no sólo en la apariencia sino, sobre todo, en el procesamiento posterior y en la vida útil del producto. Además, la flexibilidad inherente del proceso de corte por láser se ve contrarrestada por el hecho de que es más lento que las operaciones de punzonado tradicionales.

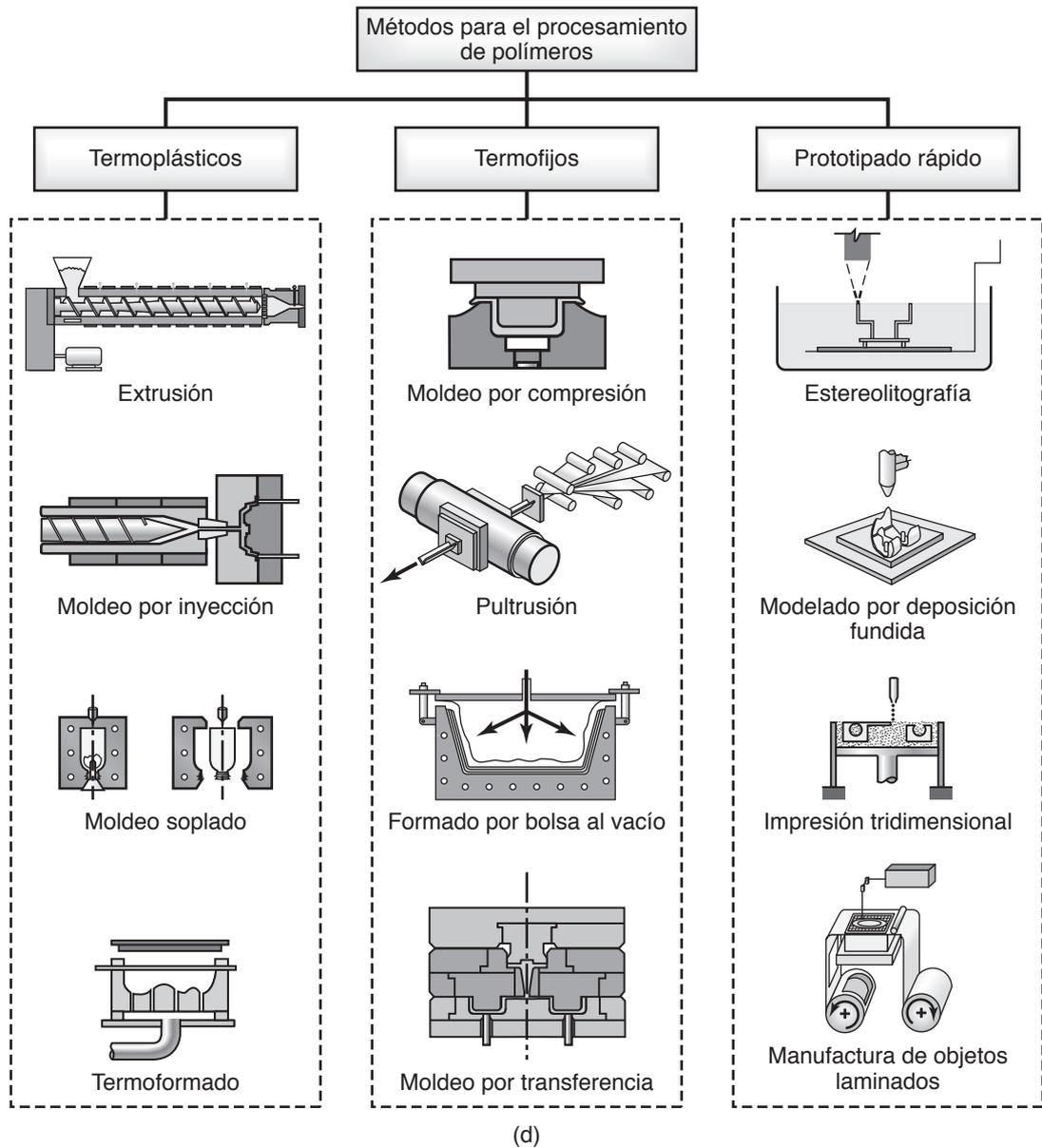


FIGURA 1.5d Ilustraciones esquemáticas de varios métodos utilizados para el procesamiento de polímeros.

Existen varios factores que pueden tener un papel importante en la selección del proceso, incluyendo el tamaño de la pieza, la complejidad de la forma y la exactitud dimensional y el acabado superficial requeridos. Por ejemplo:

- Las piezas planas y las secciones delgadas pueden ser difíciles de fundir.
- Por lo general, las piezas complejas no pueden formarse de manera sencilla y económica mediante técnicas como el forjado de metales; mientras que, dependiendo del tamaño y del nivel de complejidad de las piezas, éstas podrían fundirse a precisión, fabricarse y ensamblarse a partir de piezas individuales o producirse mediante técnicas de metalurgia de polvos.
- En las operaciones de trabajo en caliente, las tolerancias dimensionales y el acabado superficial no son tan finos como los obtenidos en las operaciones llevadas a cabo a temperatura ambiente (en frío) debido a los cambios dimensionales, la distorsión,

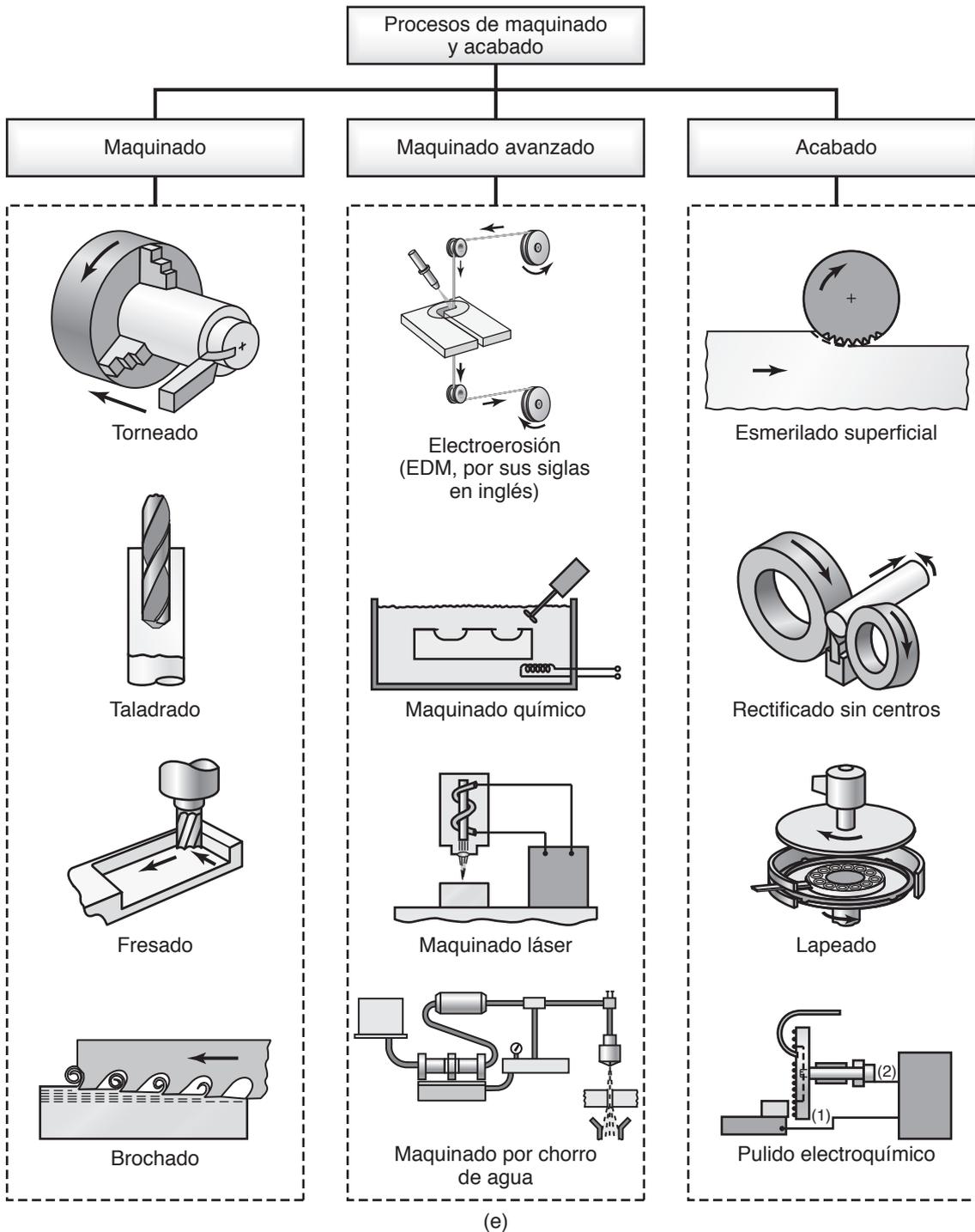


FIGURA I.5e Ilustraciones esquemáticas de varios procesos de maquinado y acabado.

la deformación y la oxidación de la superficie provocados por las altas temperaturas que se emplean.

El tamaño de los productos manufacturados, así como la maquinaria y el equipo utilizados en su procesamiento, varían ampliamente desde engranajes y mecanismos de tamaño micrométrico, como los ilustrados en la figura I.7, hasta (a) el tren de aterrizaje principal

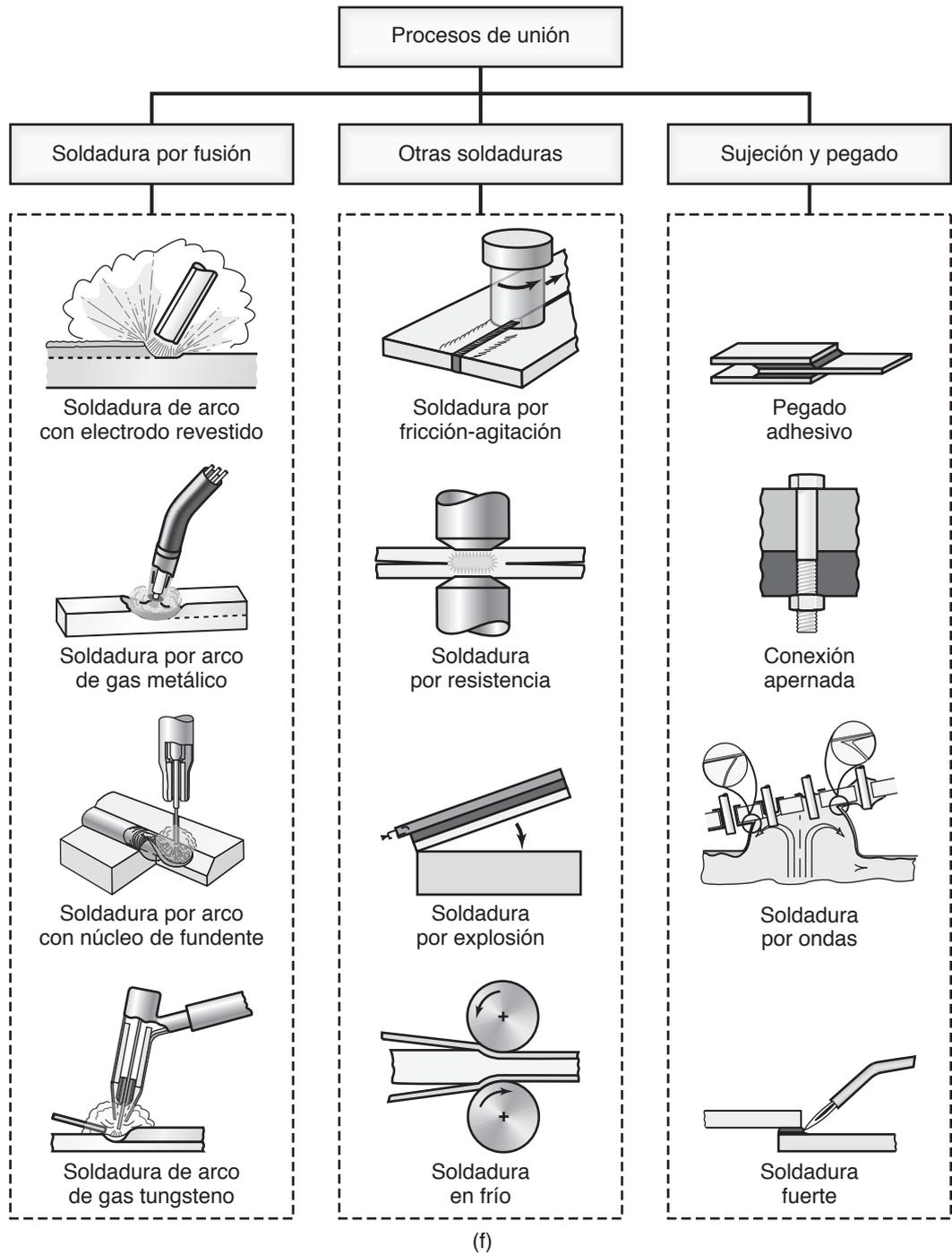


FIGURA I.5f Ilustraciones esquemáticas de varios procesos de unión.

del avión Boeing 777, que tiene 4.3 m (14 pies) de altura y consta de tres ejes y seis ruedas; (b) el alimentador para la turbina de una central hidroeléctrica, que tiene 4.6 m (180 pulg) de diámetro y pesa 50 000 kg (110 000 lb), y (c) un gran rotor de una turbina de vapor, con un peso de 300 000 kg (700 000 lb).

Sustitución del proceso. Es una práctica común en la industria que, por diversas razones y después de una revisión de todos los procesos pertinentes y aplicables, un método de pro-

ducción particular (que podría haberse empleado en el pasado) deba sustituirse por otro. Consideremos, por ejemplo, los siguientes productos que se pueden manufacturar mediante cualquiera de los siguientes conjuntos de procesos: (a) cigüeñal fundido o forjado, (b) ruedas de automóvil estampadas en chapa metálica o forjadas o fundidas, (c) sartén de chapa metálica fundida o estampada, (d) soporte de polímero moldeado por inyección o extruido o colado y (e) cubierta de seguridad de una máquina soldada o remachada.

Los criterios para la selección incluyen factores como el costo, el mantenimiento requerido, si el producto es para uso industrial o de consumo, los parámetros a que se someterá el producto (por ejemplo, fuerzas externas, impacto, temperaturas y productos químicos), las preocupaciones ambientales que deben enfrentarse y el atractivo del producto para el cliente.

Manufactura de forma neta y forma casi neta. La *manufactura de forma neta* y la *manufactura de forma casi neta* constituyen, en conjunto, una metodología importante mediante la cual una pieza se fabrica en una sola operación y con las dimensiones, tolerancias y acabado superficial finales que se desean o cerca de éstos. La diferencia entre la forma neta y la forma casi neta es cuestión del grado de cercanía que tenga el producto con sus características dimensionales y de acabado superficial finales.

La necesidad de efectuar la manufactura de forma neta y obtener sus beneficios pueden apreciarse por el hecho de que, en la mayoría de los casos, suele requerirse más de una operación o un paso de manufactura adicional para producir una pieza. Por ejemplo, un cigüeñal fundido o forjado no tendrá las características dimensionales de acabado superficial necesarias y, por lo general, requerirá de un procesamiento adicional, como el maquinado o rectificado. Estas operaciones adicionales pueden contribuir de manera significativa al costo de un producto.

Los ejemplos típicos de la manufactura de forma neta incluyen la fundición de precisión (capítulo 11), el forjado (capítulo 14), el formado de lámina metálica (capítulo 16), la metalurgia

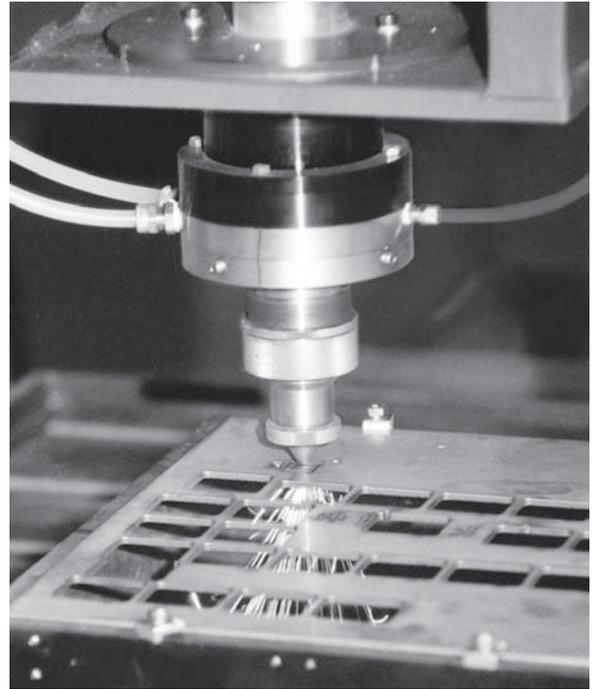
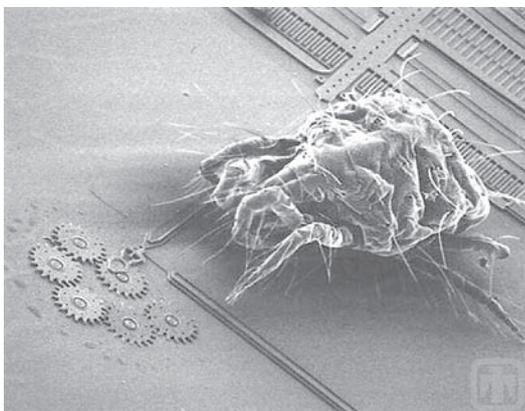
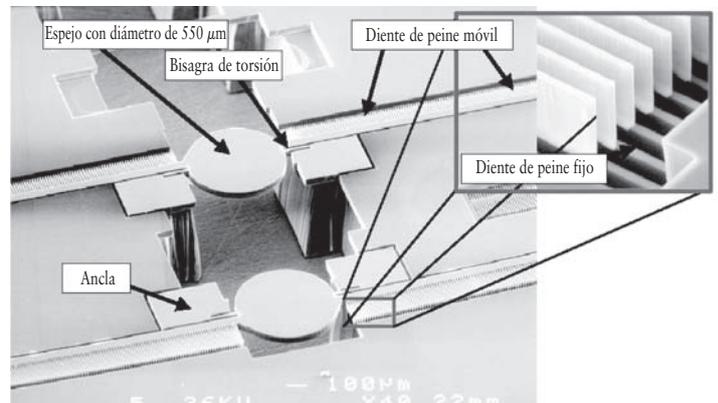


FIGURA I.6 Corte de hoja metálica mediante rayo láser. *Fuente:* Cortesía de Rofin-Sinar, Inc., y Society of Manufacturing Engineers.



(a)



(b)

FIGURA I.7 (a) Engranajes microscópicos junto a un ácaro del polvo. *Fuente:* Cortesía de Sandia National Laboratory. Impreso con autorización; (b) componente de un sensor de luz con microespejos móviles; observe la escala impresa en la parte inferior de la figura. *Fuente:* Cortesía de R. Mueller de la University of California en Berkeley.

de polvos y el moldeo por inyección de polvos metálicos (capítulo 17), así como el moldeo por inyección de plástico (capítulo 19).

Manufactura de ultraprecisión. Las precisiones dimensionales requeridas para algunos modernos equipos e instrumentos han llegado actualmente a la magnitud del retículo atómico (por debajo de 1 nm). Se están desarrollando rápidamente diversas técnicas que incluyen tecnologías muy sofisticadas para lograr dicha precisión extrema. Además, mediante maquinado, ahora es posible producir superficies tipo espejo en metales usando como herramienta de corte un diamante muy agudo, con un radio en la punta que mide 250 μm . El equipo es muy especializado, tiene rigidez muy alta (para reducir al mínimo las desviaciones, la vibración y el traqueteo durante el maquinado). El equipo se opera en un recinto donde la temperatura ambiente se controla en un margen de 1 °C con el fin de evitar distorsiones térmicas de la máquina.

Tipos de producción. El número de piezas a ser producidas (por ejemplo la cantidad anual) y la tasa de producción (el número de piezas realizadas por unidad de tiempo) son consideraciones económicas importantes en la determinación de los procesos adecuados y los tipos de máquinas requeridas. Consideremos, por ejemplo, que los focos, las latas de bebidas, las boquillas de inyección de combustible y los tapacubos se producen en cantidades y a tasas que son mucho más altas que las de los motores a reacción.

A continuación se presenta un resumen breve de los tipos generales de producción, en orden creciente según las cantidades anuales producidas:

1. **Talleres de trabajo:** lotes pequeños, por lo general de menos de 100 piezas, utilizando máquinas de uso general como tornos, fresadoras, taladros y esmeriles, muchas de las cuales, en la actualidad, están equipadas con controles computarizados.
2. **Producción por lotes pequeños:** cantidades a partir de unas 10 hasta 100 piezas usando máquinas similares a las de los talleres de trabajo.
3. **Producción por lotes:** en general, con tamaños de lote de entre 100 y 5000 piezas utilizando la maquinaria más avanzada con control por computadora.
4. **Producción en masa:** en general, con tamaños de lote mayores a 100 000 piezas utilizando maquinaria especializada, conocida como máquinas dedicadas, y varios equipos automatizados en planta para realizar la transferencia de materiales y piezas en curso.

CASO DE ESTUDIO I.3 Saleros y pimenteros

El juego de salero y pimentero mostrado en la figura I.8 consta de componentes metálicos y no metálicos. Las partes principales (el cuerpo) del juego están hechas mediante moldeo por inyección de un termoplástico (capítulo 19), por ejemplo un acrílico, que posee transparencia y otras características deseables para esta aplicación y es fácil de moldear. La tapa metálica redondeada del salero es de chapa metálica, tiene orificios (capítulo 16) y fue galvanizada para mejorar su apariencia (sección 34.9).

La perilla de la parte superior del pimentero se fabrica por maquinado (capítulo 23) y está roscada en el

interior para que pueda atornillarse y desatornillarse. La barra cuadrada que conecta la parte superior del pimentero con las dos piezas mostradas en la parte inferior de la figura se fabrica mediante una operación de laminado (capítulo 13). Los dos componentes moletores que se muestran en la parte inferior de la figura están hechos de acero inoxidable. Un análisis de diseño para la manufactura indicó que el fundido o maquinado de los dos componentes sería demasiado costoso y, en consecuencia, se determinó que un método apropiado y económico sería la técnica de metalurgia de polvos (capítulo 17).



FIGURA I.8 Juego de salero y pimentero. Las dos piezas metálicas (en la parte inferior) para el pimentero se fabrican mediante técnicas de metalurgia de polvos.
Fuente: Metal Powder Industries Federation.

I.7 Manufactura integrada por computadora

La *manufactura integrada por computadora* (CIM, por sus siglas en inglés), como lo indica su nombre, integra el software y el hardware necesarios para la elaboración de gráficos por computadora, el modelado asistido por computadora, el diseño asistido por computadora y las actividades de manufactura, desde el concepto inicial del producto hasta su producción y distribución en el mercado. Este enfoque global e integrado inició en la década de 1970 y ha sido particularmente eficaz debido a su capacidad de hacer posibles las siguientes tareas:

- Responder ante cambios rápidos en las modificaciones de diseño del producto y ante la variación en las demandas del mercado.
- Mejor uso de los materiales, la maquinaria y el personal.
- Reducción del inventario.
- Mejor control de la producción y administración de la operación de manufactura en su totalidad.

El siguiente es un resumen breve de los diversos elementos que intervienen en la CIM, todos los cuales se describen con detalle en los capítulos 38 y 39:

1. **Control numérico por computadora (CNC).** Implementado primeramente en la década de 1950, éste es un método para controlar los movimientos de los componentes de una máquina mediante la inserción directa de instrucciones codificadas en la forma de datos numéricos.
2. **Control adaptativo (AC, por sus siglas en inglés).** Los parámetros de procesamiento comprendidos en una operación se ajustan automáticamente para optimizar la tasa de producción y la calidad del producto y para reducir al mínimo los costos de manufactura. Por ejemplo, en el maquinado, es posible supervisar en forma constante las fuerzas, la temperatura, el acabado superficial y las dimensiones de la pieza. Si éstos salen de un rango especificado, el sistema ajusta automáticamente las variables apropiadas hasta que los parámetros se encuentren dentro del rango deseado.
3. **Robots industriales.** Introducidos en la década de 1960, los robots industriales (figura I.9) han estado reemplazando rápidamente a los seres humanos, especialmente en las operaciones repetitivas, peligrosas y tediosas. Como resultado, se reduce la variabilidad en la calidad del producto y se mejora la productividad. Los robots son particularmente eficaces en el traslado de materiales y en las operaciones de ensam-

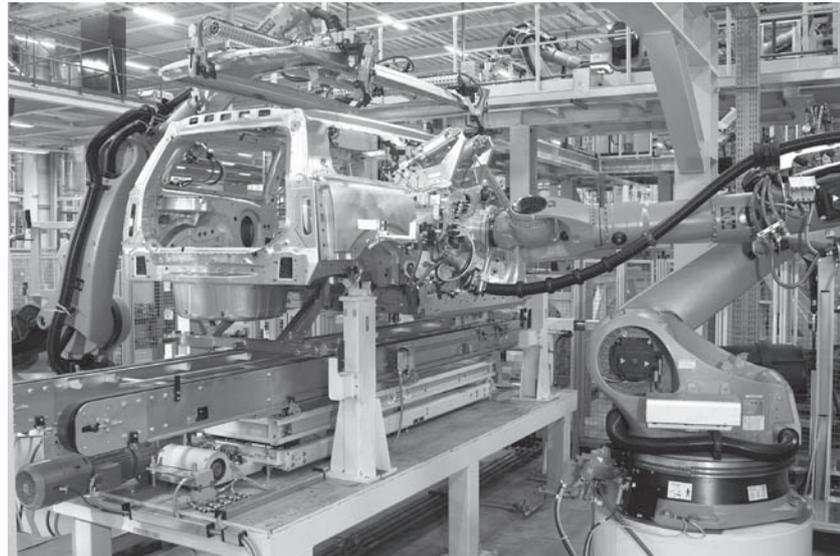


FIGURA 1.9 Soldadura por puntos automatizada sobre carrocerías de automóvil en una línea de producción en masa.

ble; se han desarrollado robots *inteligentes* con capacidades de percepción sensorial y movimientos que emulan los de los seres humanos.

4. **Manipulación automatizada de materiales.** Las computadoras han hecho posible un manejo altamente eficiente de materiales y componentes en diversas fases de ejecución (trabajo en curso), como el traslado de una pieza de una máquina a otra, luego hacia los puntos de inspección, el almacén y, finalmente, hacia su envío.
5. **Sistemas de ensamble automatizado.** Estos sistemas se han desarrollado para sustituir el ensamble realizado por humanos, a pesar de que éstos todavía tienen que realizar algunas operaciones. Dependiendo del tipo de producto, los costos de ensamblado pueden ser altos y, en consecuencia, los productos deben diseñarse de tal manera que puedan ensamblarse con mayor facilidad y rapidez usando maquinaria automatizada.
6. **Planeación de procesos asistida por computadora (CAPP, por sus siglas en inglés).** Mediante la optimización de la planeación del proceso, este sistema es capaz de mejorar la productividad, la calidad del producto y la consistencia, reduciendo así los costos. En el sistema también se incorporan funciones como estimación de costos y monitoreo de los estándares de trabajo (tiempo necesario para realizar una operación determinada).
7. **Tecnología de grupos (GT, por sus siglas en inglés).** El concepto detrás de la tecnología de grupos es que muchas piezas pueden agruparse y producirse clasificándolas en familias, de acuerdo con sus similitudes en (a) el diseño y (b) los procesos de manufactura empleados para producirlas. De este modo, los diseños de piezas y los planes de procesamiento pueden estandarizarse y es posible producir piezas nuevas, basadas en partes similares fabricadas anteriormente, de manera eficiente y económica.
8. **Producción justo a tiempo (JIT, por sus siglas en inglés).** El principio detrás de la producción justo a tiempo es que (a) los suministros de materias primas y piezas se entregan al fabricante justo a tiempo para ser usados, (b) las piezas y los componentes se producen justo a tiempo para conformar subensambles y (c) los productos se ensamblan y terminan justo a tiempo para ser entregados al cliente. Como resultado, los costos de inventario son bajos, los defectos en los componentes se detectan de inmediato, la productividad se incrementa y se fabrican productos de alta calidad a bajo costo.
9. **Manufactura celular (CM, por sus siglas en inglés).** Este sistema utiliza estaciones de trabajo que consisten en cierta cantidad de *células de manufactura*, cada célula

cuenta con diversa maquinaria de producción controlada por un robot central y cada máquina realiza una operación específica sobre la pieza, incluyendo la inspección.

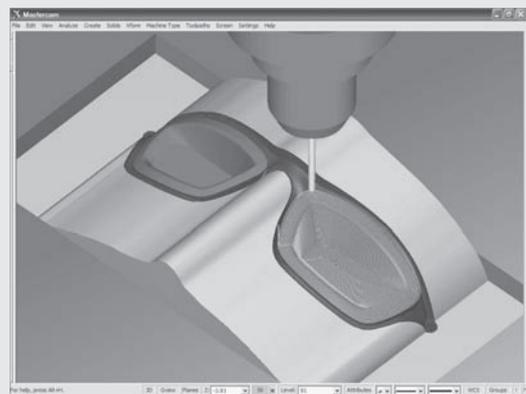
10. **Sistemas de manufactura flexible (FMS, por sus siglas en inglés).** Estos sistemas integran células de manufactura en una planta de producción grande, donde todas las células están interconectadas a una computadora central. Aunque tienen un alto costo, los sistemas de manufactura flexible son capaces de producir piezas de manera eficiente (en cantidades relativamente pequeñas puesto que la automatización tradicional todavía es la más eficiente para la producción en masa) y de cambiar rápidamente las secuencias de manufactura necesarias para fabricar piezas diferentes. La flexibilidad permite que estos sistemas respondan a cambios rápidos en la demanda del mercado para cualquier tipo de producto.
11. **Sistemas expertos (SE, por sus siglas en inglés).** Consisten básicamente en programas de computadora complejos. Estos sistemas tienen capacidad para realizar tareas diversas y resolver problemas difíciles de la vida real (de manera muy parecida a como lo haría un experto humano), lo cual incluye acelerar el proceso iterativo tradicional.
12. **Inteligencia artificial (AI, por sus siglas en inglés).** Los sistemas controlados por computadora son capaces de aprender de la experiencia y de la toma de decisiones que optimizan las operaciones y minimizan los costos; en última instancia, se trata de sustituir la inteligencia humana.
13. **Redes neuronales artificiales (ANN, por sus siglas en inglés).** Estas redes están diseñadas para simular procesos de pensamiento del cerebro humano, tienen capacidades como el modelado y la simulación de instalaciones de producción, el monitoreo y control de operaciones de manufactura, el diagnóstico sobre problemas de rendimiento de las máquinas, así como la realización de planeación financiera y administración de la estrategia de producción de una empresa.

CASO DE ESTUDIO I.4 Molde para armazones de lentes para el sol

El molde de metal usado para el moldeo por inyección de plástico de armazones de lentes para el sol se realiza en una máquina fresadora controlada numéricamente por computadora, la cual usa un cortador (llamado fresa frontal de bola) como el que se muestra en la figura I.10. Primero, se hace un modelo de los lentes de sol usando un paquete de software de diseño asistido por computadora, desde donde se genera automáticamente un modelo del molde. La información geométrica se envía a la máquina de fresado y se planifican las operaciones de maquinado.

A continuación, se añade un ajuste a cada superficie para tener en cuenta el radio de la punta de la fresa frontal de bola durante el maquinado, con lo que se determina la trayectoria de corte (la trayectoria que sigue el centro de rotación del husillo de la máquina). El software de programación por control numérico ejecuta este programa de maquinado en la máquina fresadora, produciendo la cavidad del troquel con las dimensiones y tolerancias apropiadas. Para hacer este molde, también puede usarse maquinado por electroerosión o descarga eléctrica (sección 27.5); sin embargo, se determinó que dicha operación es aproximadamente dos veces más cara que la del molde maquinado mediante control numérico por computadora y que, además, produce moldes con una precisión dimensional inferior.

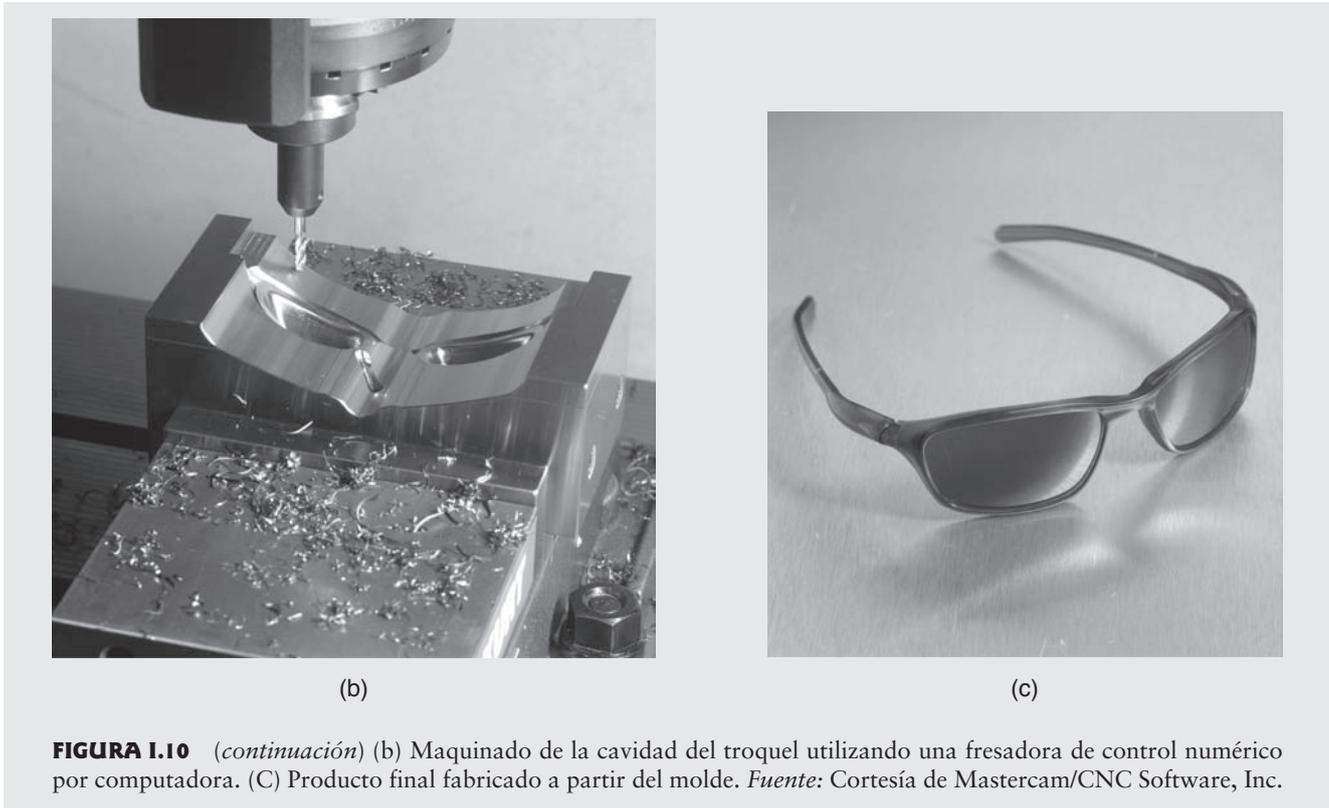
Fuente: Basado en Mastercam/CNC Software, Inc.



(a)

FIGURA I.10 Maquinado de la cavidad de un molde para fabricar lentes para el sol. (a) Modelo realizado por computadora de los lentes para el sol según su diseño y vista en el monitor. *Fuente:* Cortesía de Mastercam/CNC Software, Inc.

(continúa)



1.8 Aseguramiento de la calidad y administración de la calidad total

La *calidad del producto* es una de las consideraciones más importantes en la industria manufacturera porque influye directamente en la satisfacción del cliente y juega un papel crucial en la determinación del éxito de un producto en el mercado (capítulo 36). El enfoque tradicional de inspeccionar los productos después de que se fabrican ha sido sustituido en gran medida al reconocer que *la calidad debe estar incorporada al producto*, desde su diseño inicial y a través de todas las etapas posteriores de manufactura y ensamble.

Dado que los productos suelen fabricarse a lo largo de varios pasos y operaciones de manufactura, cada paso puede implicar sus propias variaciones significativas en el desempeño; esta variación puede ocurrir incluso dentro de un tiempo relativamente corto. Por ejemplo, una máquina de producción puede desempeñarse de manera diferente cuando se enciende por primera vez a como lo hace después de que se calienta por el uso, o cuando fluctúa la temperatura ambiente en la planta. Por lo tanto, el *control continuo de los procesos* (conocido como el *monitoreo en línea*) es un factor crítico para mantener la calidad del producto, donde el objetivo es *controlar los procesos, no los productos*.

El *aseguramiento de la calidad* y la *administración de la calidad total* (TQM, por sus siglas en inglés) son ampliamente reconocidos como una responsabilidad de todos los involucrados en el diseño y la fabricación de productos y sus componentes. La *integridad del producto* es un término general utilizado para definir el grado en que un producto:

- Funciona de manera confiable durante su vida esperada (tabla I.4).
- Es adecuado para los fines previstos.
- Se puede mantener con relativa facilidad.

Producir y comercializar artículos defectuosos puede resultar muy caro para el fabricante, con costos que varían en órdenes de magnitud, como se muestra en la tabla I.5.

Todos los pioneros en el control de calidad, en particular W. E. Deming (1900-1993), J. M. Juran (1904-2008) y G. Taguchi (1924-2012), hicieron hincapié en la importancia del compromiso de la administración con (a) la calidad del producto, (b) el orgullo por el trabajo realizado en todos los niveles de producción y (c) la necesidad de usar el **control estadístico del proceso** (SPC, por sus siglas en inglés) y **gráficas de control** (capítulo 36). También señalaron la importancia de la supervisión en línea y la identificación rápida de las *fuentes de los problemas de calidad* en la producción, incluso antes de que se produzca otra pieza defectuosa. El objetivo principal del control es *evitar* que se produzcan piezas defectuosas, en vez de inspeccionar, detectar y rechazar las piezas defectuosas después de que se hayan fabricado.

Como ejemplo de un control de calidad estricto, tenemos que los chips de computadora se producen con una calidad tan alta que sólo unos cuantos entre un millón pueden llegar a estar defectuosos. El nivel de defectos se identifica en términos de la **desviación estándar**, denotada por el símbolo σ (la letra griega *sigma*). Tres sigma darían lugar a 2700 partes defectuosas por millón, lo que es demasiado alto en la manufactura moderna. De hecho, se ha estimado que con este nivel ninguna computadora moderna funcionaría de manera confiable. Con **seis sigma**, las piezas defectuosas se reducen a sólo 3.4 por millón de piezas fabricadas; este nivel se ha alcanzado gracias a mejoras importantes en las *capacidades del proceso* de manufactura con el fin de *reducir la variabilidad* en la calidad del producto.

Los desarrollos más importantes en el aseguramiento de la calidad incluyen la implementación del **diseño experimental**, una técnica en la que se estudian simultáneamente los factores que intervienen en una operación de manufactura y sus interacciones. Por ejemplo, las variables que afectan la precisión dimensional o el acabado superficial en una operación de maquinado pueden identificarse fácilmente, con lo que es posible realizar los ajustes preventivos adecuados en el momento apropiado.

Estándares de calidad. La manufactura y la competitividad globales han dado lugar a una evidente necesidad de cumplimiento y consenso internacionales para establecer métodos de control de la calidad. Esta necesidad se tradujo en la creación del conjunto de normas ISO 9000 para la administración y el aseguramiento de la calidad, así como de los estándares QS 9000 (sección 36.6), presentados en 1994. El registro de una empresa ante estas normas, lo cual significa obtener una *certificación de la calidad del proceso*, no una certificación del producto, quiere decir que la compañía se ajusta a las prácticas consistentes que especifica su propio sistema de calidad. ISO 9000 y QS 9000 han influido permanentemente en la manera en que las empresas hacen negocios en el comercio global, en la actualidad constituyen además el estándar mundial de calidad.

Ingeniería de los factores humanos. Este tema se ocupa de las interacciones hombre-máquina y, por lo tanto, es un aspecto importante de las operaciones de manufactura en una planta, así como del uso esperado de los productos. El enfoque de los factores humanos es fundamental en el diseño y la manufactura de productos seguros; pone énfasis en la **ergonomía**, la cual se define como el estudio de la forma en que el lugar de trabajo, la maquinaria y el equipo pueden diseñarse y distribuirse de mejor manera para lograr comodidad, seguridad, eficiencia y productividad.

Algunos ejemplos de la necesidad de realizar consideraciones ergonómicas adecuadas son: (a) un mecanismo difícil de operar manualmente, lo que causa lesiones en el trabaja-

TABLA I.4

Esperanza de vida promedio para diversos productos	
Tipo de producto	Esperanza de vida (años)
Billete de un dólar estadounidense	1.5
Computadora personal	2
Batería de automóvil	4
Secadora de cabello	5
Automóvil	8
Lavavajillas	10
Unidad trituradora para cocina	10
Aspiradora	10
Calentador de agua (gas)	12
Secadora de ropa (gas)	13
Lavadora de ropa	13
Unidad de aire acondicionado (central)	15
Célula de manufactura (estación de trabajo)	15
Refrigerador	17
Horno (gas)	18
Maquinaria	30
Reactor nuclear	40

Nota: Se pueden presentar variaciones significativas dependiendo de la calidad del producto y del mantenimiento que reciba.

TABLA I.5

Costo relativo de reparación en diversas etapas del desarrollo y la venta de los productos	
Etapas	Costo relativo de reparación
Cuando la pieza se está fabricando	1
Subensamble del producto	10
Ensamble del producto	100
Producto con el distribuidor	1000
Producto con el cliente	10 000

dor, (b) un teclado mal diseñado que causa dolor en las manos y los brazos del usuario durante su uso normal (conocido como *síndrome de estrés repetitivo*) y (c) un panel de control en una máquina cuyo acceso o uso con seguridad y comodidad es difícil.

Responsabilidad del producto. El diseño y la manufactura de productos seguros es un aspecto esencial de las responsabilidades de un fabricante. Todos los participantes en el diseño, la fabricación y la comercialización de los productos deben reconocer plenamente las consecuencias de la falla de un producto, incluyendo fallas debidas a un uso erróneo previsible del producto.

La falla o el mal funcionamiento de un producto pueden causar daños personales o incluso la muerte, así como pérdidas financieras a un individuo, a una tercera persona o a una organización. Este importante tema se conoce como *responsabilidad del producto*. Las leyes que la rigen varían de localidad a localidad y de país a país. Entre los numerosos ejemplos de productos que podrían implicar una responsabilidad están:

- Una rueda de esmeril que se rompa y cause lesiones a un trabajador.
- Un cable que sostenga una plataforma y se rompa, con lo que la plataforma cae y causa daños corporales o la muerte.
- Los frenos de un automóvil que dejen de funcionar repentinamente debido a una falla en un componente particular del sistema de frenado.
- Maquinaria industrial carente de las protecciones de seguridad adecuadas.
- Herramientas eléctricas y neumáticas que carezcan de advertencias e instrucciones adecuadas para su utilización segura.

1.9 Producción esbelta y manufactura ágil

La *producción esbelta* (sección 39.6) es una metodología que consiste en realizar una evaluación exhaustiva de cada actividad de una empresa, tiene el propósito fundamental de reducir al mínimo los desperdicios en todos los niveles y buscar la eliminación de operaciones innecesarias que no aporten ningún valor agregado al producto que se fabrica. Este método, también llamado *manufactura esbelta*, identifica todas las actividades de un fabricante y optimiza los procesos que utiliza con el fin de *maximizar el valor agregado*. La producción esbelta se enfoca en (a) la eficiencia y eficacia de cada etapa de la manufactura, (b) la eficiencia de las máquinas y los equipos utilizados y (c) las actividades del personal que participa en cada operación. Esta metodología también incluye un análisis exhaustivo de los gastos realizados en cada actividad y los gastos por mano de obra productiva y no productiva.

La estrategia de producción esbelta requiere un cambio fundamental en la cultura de una empresa, así como entender la importancia de la *cooperación y el trabajo en equipo* entre los empleados y la administración de la compañía. La producción esbelta no necesariamente requiere un recorte de los recursos físicos y humanos de una empresa, sino que tiene como objetivo la mejora *continua* de la eficiencia y la rentabilidad mediante la eliminación de todos los desperdicios en las operaciones de la compañía y hacer frente a cualquier problema tan pronto como se presente.

Manufactura ágil. El principio detrás de la *manufactura ágil* es garantizar la *agilidad* y, por lo tanto, la *flexibilidad* en una empresa de manufactura, de modo que pueda responder rápida y eficazmente a los cambios en la demanda del producto y en las necesidades del cliente. La flexibilidad puede lograrse a través de las personas, los equipos, el hardware y el software y sistemas de comunicación avanzados. Como un ejemplo de este enfoque, se ha demostrado que la industria automotriz puede configurar y construir un automóvil en tres días y que, en algún momento, la línea de ensamble tradicional será sustituida por un sistema en el que se producirá un automóvil casi a la medida mediante la combinación de varios módulos individuales.

Las metodologías de producción esbelta y manufactura ágil requieren que el fabricante realice una evaluación comparativa de marcas (o *benchmarking*) de sus operaciones. El benchmarking consiste en evaluar la posición competitiva de otros fabricantes con respecto a la posición propia (incluyendo el tiempo de producción de artículos de calidad y los costos de manufactura), así como en establecer metas realistas para el futuro. El benchmarking se convierte así en un *punto de referencia* desde el cual pueden realizarse varias mediciones con fines comparativos.

I.10 Costos de manufactura y competencia global

La economía de la manufactura siempre ha sido muy importante, pero se ha vuelto aún más debido (a) al constante aumento de la competencia global y (b) a la demanda de productos de alta calidad, generalmente conocida como *manufactura de clase mundial*, a precios bajos. Normalmente, el costo de *manufactura* de un producto representa alrededor del 40% de su *precio de venta*, lo que a menudo es el factor predominante en la comercialización de un producto y la satisfacción del cliente en general. La tabla I.6 muestra un desglose aproximado, pero típico, de los costos presentes en la manufactura moderna; sin embargo, los porcentajes indicados pueden variar mucho dependiendo del tipo de producto.

Por lo general, el *costo total* de manufactura de un producto consta de los siguientes componentes:

1. **Materiales.** Los costos de las materias primas dependen del propio material y de su oferta y demanda. Un costo bajo puede no ser el factor decisivo si el costo de procesamiento de un material en particular es mayor que el de un material más caro. Por ejemplo, una pieza metálica de bajo costo puede requerir más tiempo de maquinado o formado que una de mayor costo, aumentando así los costos de producción.
2. **Herramentales o utillaje.** Los costos herramentales incluyen aquellos provenientes de las herramientas de corte, troqueles, moldes, dispositivos de sujeción de la pieza de trabajo y sus accesorios. Algunas herramientas de corte cuestan desde sólo 2 hasta cerca de 100 dólares estadounidenses para cortar materiales como el nitruro de boro cúbico y el diamante. Dependiendo de su tamaño y de los materiales que intervengan en su elaboración, la adquisición de moldes y troqueles puede requerir desde unos pocos cientos hasta más de \$2 millones de dólares para un conjunto de troqueles de estampado en chapa metálica con los cuales hacer defensas de automóviles.
3. **Fijos.** Los costos fijos incluyen costos de la energía, alquiler de instalaciones, seguros e impuestos inmobiliarios.
4. **Capital.** Los costos de capital típicos están constituidos por la maquinaria y el equipo de producción, los edificios y los terrenos. Los costos de maquinaria pueden ir desde unos pocos cientos hasta millones de dólares. Aunque el costo de la maquinaria controlada por computadora puede ser muy alto, el gasto bien puede estar justificado si se reducen los costos por mano de obra.
5. **Mano de obra.** Los costos de mano de obra pueden ser costos directos e indirectos. La mano de obra directa, llamada también trabajo productivo, se refiere a la mano de obra que interviene directamente en la fabricación de los productos. La mano de obra indirecta, llamada también trabajo no productivo o general, se refiere a los servicios prestados a la operación de manufactura en su totalidad.

Los costos directos de mano de obra pueden ser sólo del 10 al 15% del costo total (tabla I.6), pero pueden llegar hasta 60% para los productos que requieren una mano de obra intensiva. La reducción de la participación de la mano de obra directa en los costos de manufactura puede conseguirse por medios como una extensa automatización, el control por computadora de todos los aspectos de la manufactura, la aplicación de tecnologías modernas y mayor eficiencia en las operaciones.

Como era de esperar, y como lo muestra la tabla I.7, sigue existiendo una disparidad en todo el mundo con respecto a la magnitud de los costos de mano de obra. No es de extrañar que, actualmente, muchos productos de consumo se fabriquen o ensamblen en países de la costa del Pacífico, sobre todo en China. Asimismo, el desarrollo de software y tecnologías

TABLA I.6

Desglose de costos típico en la industria manufacturera	
Diseño	5%
Materiales	50%
Manufactura	
Mano de obra directa	15%
Mano de obra indirecta	30%

TABLA I.7

Remuneración relativa aproximada por hora para los trabajadores manufactureros en 2010 (Estados Unidos = 100)			
Noruega	166	Italia	96
Suiza	153	Japón	92
Bélgica	146	España	76
Dinamarca	131	Nueva Zelandia	59
Alemania	126	Israel	58
Suecia	126	Singapur	55
Finlandia	122	Corea (del Sur)	48
Austria	118	Argentina, Eslovaquia	36
Países Bajos, Australia	118	Portugal	34
Francia	117	República Checa	33
Irlanda	104	Polonia	23
Estados Unidos	100	México	18
Canadá	97	China, India, Filipinas	6

Nota: La remuneración puede variar significativamente considerando las prestaciones. Los datos de China e India son estimaciones porque ahí se usan medidas estadísticas diferentes para calcular la remuneración y aquí se proporcionan sólo con fines de comparación.

Fuente: Departamento del Trabajo de Estados Unidos.

de información suele ser mucho menos costoso en países como India y China que en Estados Unidos o Europa. Sin embargo, como el nivel de vida sigue aumentando, los costos de mano de obra también están comenzando a subir significativamente en estos países.

Subcontratación (outsourcing). La *subcontratación* se define como la compra por parte de una empresa de piezas y/o mano de obra desde una fuente externa, ya sea a partir de otra empresa o de otro país, con el fin de reducir los costos de diseño y manufactura. En teoría, este enfoque permite a las empresas concentrarse en sus habilidades básicas y ser capaces de optimizar sus tecnologías críticas. Sin embargo, la subcontratación tiene diversas desventajas como, por ejemplo, su impacto social y las implicaciones políticas de reducir la oferta de empleos, sobre todo en países de la Unión Europea y en Estados Unidos. En los últimos años, los gastos de envío y transportación han aumentado y se han vuelto más inciertos, por lo que los fabricantes suelen preferir ubicarse cerca de sus clientes y/o proveedores. Como resultado, ha iniciado una tendencia hacia la **relocalización**, lo cual implica la reubicación de las actividades de manufactura en unos pocos lugares críticos, por lo general cerca de los clientes.

I.11 Tendencias en la manufactura

Existen varias tendencias en relación con diversos aspectos de la manufactura moderna, a saber:

1. La variedad y complejidad de los productos siguen aumentando.
2. Los ciclos de vida de los productos son cada vez más cortos.
3. Los mercados continúan volviéndose multinacionales y la competencia global está aumentando rápidamente.
4. Los clientes exigen de manera constante productos de alta calidad, confiables y de bajo costo.
5. Sigue habiendo desarrollos en la calidad de los materiales y en su selección para lograr mayor capacidad de reciclaje.
6. Continúan lográndose ahorros en el peso gracias al uso de materiales con mayores relaciones fuerza-a-peso y rigidez-a-peso, en particular en las industrias automotriz, aeroespacial y deportiva.

7. Se están introduciendo mejoras en los modelos que pronostican los efectos de los parámetros de procesamiento de material en la integridad del producto aplicados durante la etapa de diseño de un producto.
8. Existen avances en la manufactura de ultraprecisión, en la microfabricación y la nanofabricación que están acercándose al nivel de las dimensiones atómicas.
9. Las estrategias de simulación, modelación y control por computadora se aplican en todas las áreas de la manufactura.
10. Las tecnologías de prototipado rápido se aplican cada vez más en la producción de herramientas y en la fabricación digital directa.
11. Los avances en la optimización de los procesos de manufactura y los sistemas de producción los están volviendo más ágiles.
12. La producción esbelta y la tecnología de la información se están implementando como herramientas poderosas para ayudar a enfrentar los desafíos globales.
13. Las actividades de manufactura no se ven como tareas individuales y separadas, sino que constituyen un sistema de gran tamaño en el que todas sus partes están interrelacionadas.
14. Se ha vuelto común incorporar la calidad en el producto durante cada etapa de su producción.
15. Cada vez con mayor frecuencia se buscan métodos de manufactura más económicos y respetuosos del medio ambiente (verdes); la administración de la energía es cada vez más importante.
16. Se realizan esfuerzos continuos dirigidos a lograr mayores niveles de productividad y a eliminar o minimizar los desperdicios mediante el uso óptimo de los recursos de una organización.

Fundamentos de los materiales: comportamiento y propiedades de manufactura

PARTE

I

La parte I de este texto comienza con la descripción del comportamiento y de las propiedades de los materiales, de sus características de manufactura y aplicaciones, así como de las ventajas y limitaciones que influyen en su selección para el diseño y la fabricación de productos.

Con el fin de destacar la importancia de los temas que se describirán, considere un automóvil común como ejemplo de un producto que utiliza una amplia variedad de materiales (figura I.1). Estos materiales se seleccionaron no sólo porque poseen las propiedades y características deseadas para las funciones previstas que realizará cada pieza, sino también porque pueden manufacturarse al menor costo.

Por ejemplo, el acero se eligió para las piezas de la carrocería porque es fuerte, fácil de moldear y de bajo costo. Se usaron plásticos en muchos de los componentes debido a características como su peso ligero, resistencia a la corrosión, disponibilidad en una amplia variedad de colores y facilidad de manufactura en formas complejas y a bajo costo. El vidrio fue elegido para todas las ventanas porque es transparente, duro (por lo tanto, resistente a las raspaduras), fácil de moldear y fácil de limpiar. Es posible hacer numerosas observaciones similares acerca de todos los componentes de un automóvil, desde los tornillos más diminutos hasta las ruedas. En los últimos años, la eficiencia del combustible y la necesidad de mejorar el rendimiento han conducido a la sustitución

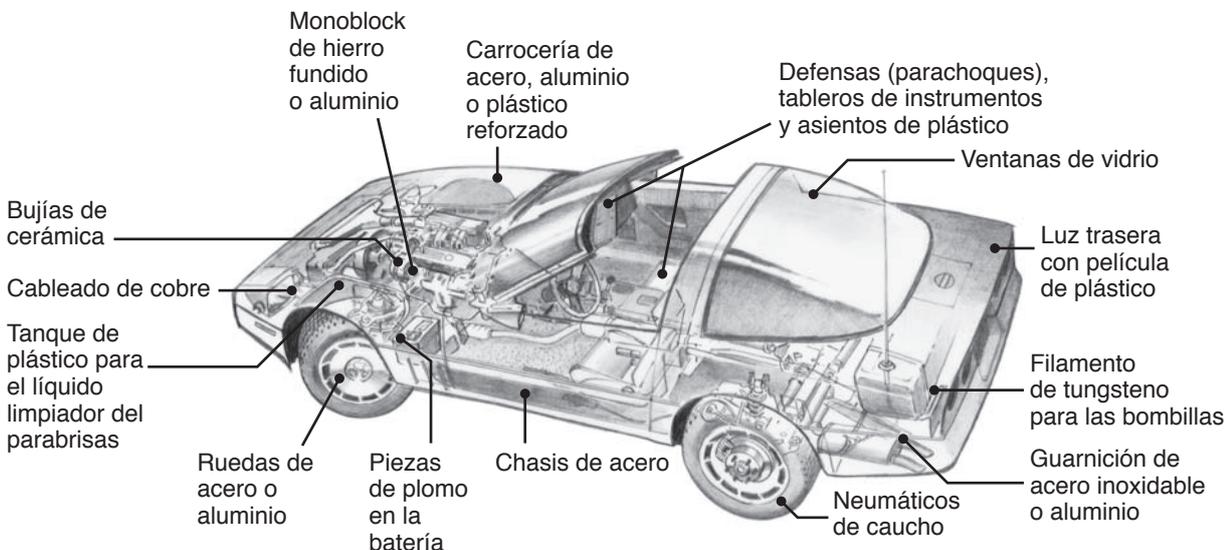


FIGURA I.1 Resumen de los temas descritos en la parte I de este libro.

del acero por materiales como aluminio, magnesio y plástico y a usar materiales compuestos para los componentes estructurales (de carga).

Tal como se estableció en la Introducción general, la selección de materiales para elaborar los componentes individuales de un producto requiere de un conocimiento profundo y una evaluación de sus propiedades, funciones y costos de manufactura. Un automóvil común es un conjunto aproximado de 15 000 piezas individuales; en consecuencia, con sólo ahorrar un centavo en el costo por pieza, por ejemplo, mediante la selección de un material o proceso de manufactura diferente, el costo de un automóvil se reduciría en \$150. Por lo tanto, esta tarea se vuelve muy desafiante, especialmente con la creciente variedad de materiales y procesos de manufactura que están disponibles en la actualidad, como se indica en la figura I.2.

En la figura I.3 se presenta un esquema general de los temas descritos en la parte I de este texto. El conocimiento básico que se presenta sobre el comportamiento, las propiedades y las características de los materiales ayudará a comprender su importancia y relevancia para todos los procesos de manufactura descritos en las partes II a V.

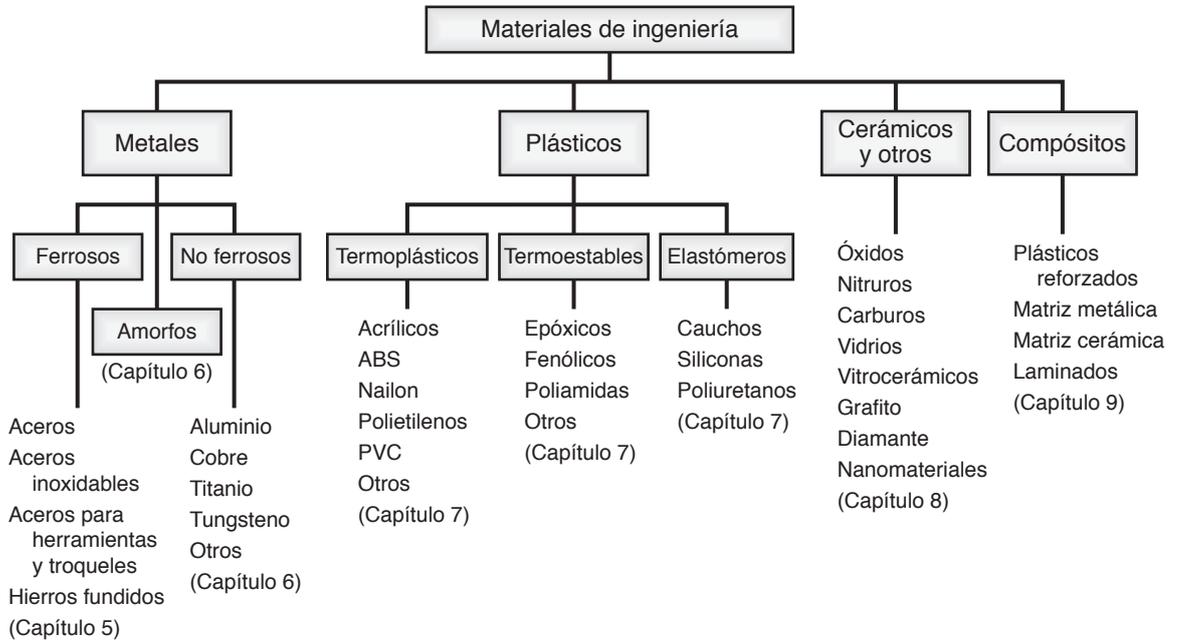


FIGURA I.2 Esquema de los materiales de ingeniería descritos en la parte I.

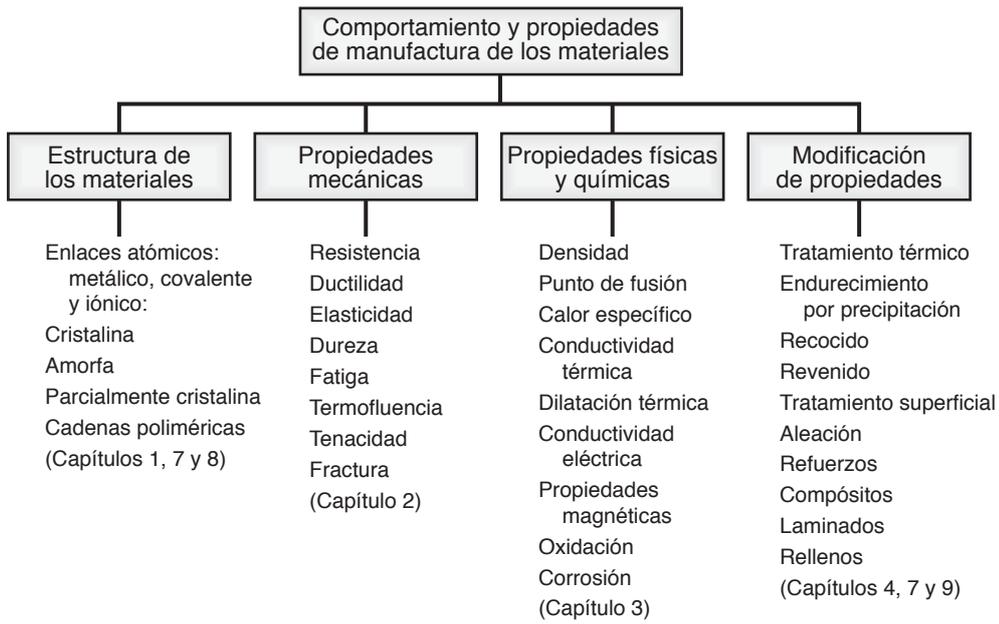


FIGURA I.3 Esquema del comportamiento y de las propiedades de manufactura de los materiales descritos en la parte I.

Estructura de los metales

1.1	Introducción	38
1.2	Tipos de enlaces atómicos	39
1.3	Estructura cristalina de los metales	40
1.4	Deformación y resistencia de los monocristales	42
1.5	Granos y límites de grano	45
1.6	Deformación plástica de los metales policristalinos	48
1.7	Recuperación, recristalización y crecimiento del grano	49
1.8	Trabajo en frío, trabajo en tibio y trabajo en caliente	50

EJEMPLO:

1.1	Número de granos en un clip para papel	47
-----	--	----

- En este capítulo se describe la estructura cristalina de los metales y se explica la forma de determinar sus propiedades y su comportamiento.
- Se inicia con un repaso de los tipos de enlaces atómicos y sus características: iónico, covalente y metálico.
- Después se examinan las estructuras metálicas y la disposición de los átomos dentro de la estructura, además se presentan los tipos de imperfecciones en la estructura cristalina y sus efectos.
- Se examinan los efectos de los granos y los límites de grano, seguidos por un análisis del endurecimiento por deformación y de la anisotropía de los metales.

1.1 Introducción

¿Por qué algunos metales son duros y otros blandos? ¿Por qué algunos son frágiles mientras que otros son dúctiles y pueden moldearse con facilidad sin que se presenten fracturas? ¿Por qué algunos metales pueden resistir altas temperaturas y otros no? ¿Por qué una pieza de lámina metálica puede comportarse de manera diferente cuando se estira en una dirección que cuando lo hace en otra?

Estas preguntas pueden responderse mediante el estudio de la **estructura atómica** de los metales —es decir, la disposición que guardan los átomos dentro de los metales—. Este conocimiento sirve entonces como una guía para controlar y predecir el comportamiento y el rendimiento de los metales en diversos procesos de manufactura. Al comprender la estructura de los metales también es posible predecir y evaluar sus **propiedades** (como la resistencia y la rigidez), lo que ayuda a elegir los más apropiados para aplicaciones específicas. Por ejemplo, los álabes de turbina monocristalinas (figura 1.1) que se usan en los motores a reacción tienen mejores propiedades que los álabes convencionales. Además de la estructura atómica, existen otros factores que también influyen en las propiedades y el comportamiento de los metales. Entre dichos factores están la composición del metal particular, las impurezas y vacancias presentes en su estructura atómica, el tamaño de grano, los límites de grano, el entorno, el tamaño y el estado de la superficie metálica, además de los métodos mediante los cuales el metal se transforma en un producto.

Los temas descritos en este capítulo y su secuencia se listan en la figura 1.2. La estructura y las propiedades generales de materiales distintos a los metales se describen en el capítulo 7 (polímeros), el capítulo 8 (cerámicos y vidrios) y el capítulo 9 (materiales compuestos o compósitos). La estructura de las aleaciones metálicas, el control de su estructura y los procesos de tratamiento térmico se describen en el capítulo 4.

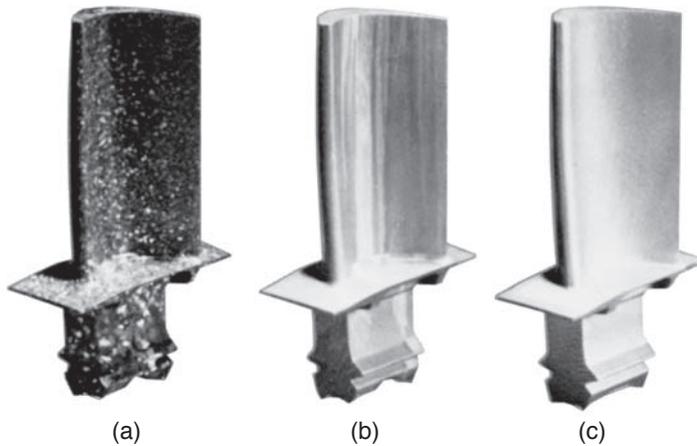


FIGURA 1.1 Álabes de turbina para motores a reacción fabricados mediante tres métodos diferentes: (a) fundidos convencionalmente, (b) solidificados direccionalmente, con granos columnares como puede verse en las franjas verticales, y (c) con monocristal. Aunque son más caros, a altas temperaturas los álabes monocristalinos tienen propiedades superiores a las de los otros álabes mostrados. *Fuente:* Cortesía de United Technologies Pratt and Whitney.

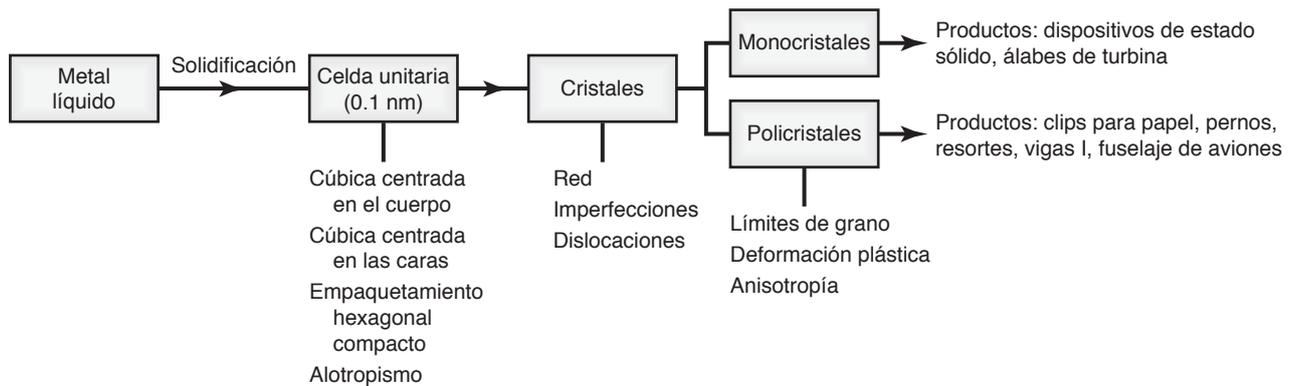


FIGURA 1.2 Esquema de los temas descritos en este capítulo.

1.2 Tipos de enlaces atómicos

Toda la materia está formada por átomos que consisten en un núcleo de *protones* y *neutrones* y en nubes u órbitas de electrones circundantes. El número de protones presentes en el núcleo determina si un átomo en particular será metálico, no metálico o semimetálico. Un átomo con una carga balanceada tiene el mismo número de electrones que de protones; cuando hay muchos o muy pocos electrones, el átomo se denomina **ion**. Un exceso de electrones da como resultado un átomo cargado negativamente, conocido como **anión**, mientras que cuando hay muy pocos electrones resulta un átomo cargado positivamente, llamado **catión**. El número de electrones presentes en la órbita más externa de un átomo determina la afinidad química de ese átomo con otros átomos.

Los átomos pueden transferir o compartir electrones; al hacerlo, se combinan múltiples átomos para formar **moléculas**. Las moléculas se mantienen unidas mediante fuerzas de atracción, llamadas **enlaces**, que actúan a través de la interacción de electrones. Los tipos básicos de atracción atómica asociada con la transferencia de electrones, llamados **enlaces primarios** o **enlaces fuertes**, son:

- **Enlaces iónicos.** Cuando uno o más electrones de una órbita externa se transfieren de un material a otro, se desarrolla una gran fuerza de atracción entre los dos iones. Un ejemplo es el de sodio (Na) y cloro (Cl) en la sal de mesa común; la sal consiste en iones Na^+ y Cl^- (de ahí el término *enlace iónico*) que se atraen fuertemente entre sí. Además, la atracción se presenta entre todos los iones adyacentes permitiendo la formación de estructuras cristalinas, como se estudia en la sección 1.3. Por lo general, las moléculas con enlaces iónicos tienen baja ductilidad y baja conductividad térmica y eléctrica. El enlace iónico es el tipo de enlace predominante en los materiales cerámicos.
- **Enlaces covalentes.** En un enlace covalente, los átomos comparten electrones de las órbitas exteriores para formar moléculas. El número de electrones compartidos se refleja en expresiones como “enlace sencillo”, “enlace doble”, etc. Los polímeros consisten en moléculas de gran tamaño unidas en forma covalente. Por lo general, los sólidos formados mediante un enlace covalente tienen baja conductividad eléctrica y pueden tener alta dureza; por ejemplo, el diamante es una forma de carbono con enlace covalente.
- **Enlaces metálicos.** Los metales tienen relativamente pocos electrones en sus órbitas exteriores y, por lo tanto, no pueden completar la capa exterior cuando están autoacoplados. En vez de eso, los metales y las aleaciones forman *enlaces metálicos* mediante los cuales los electrones disponibles son compartidos por todos los átomos que están en contacto. La nube de electrones resultante proporciona fuerzas de atracción suficientes para mantener unidos los átomos, lo que suele resultar en alta conductividad térmica y eléctrica.

Además de las grandes fuerzas de atracción asociadas con los electrones, se producen **enlaces secundarios** o atracciones débiles entre las moléculas. También conocidas como fuerzas de **Van der Waals**, estas fuerzas surgen de la atracción de cargas opuestas sin que haya transferencia de electrones. Por ejemplo, las moléculas de agua constan de un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno más pequeños que se localizan aproximadamente a 104° uno del otro. Aunque cada molécula tiene una carga balanceada, o neutra, hay más átomos de hidrógeno en un lado de la molécula (es decir, se trata de un *dipolo*) de modo que ésta desarrolla una atracción débil hacia los átomos de oxígeno cercanos que se ubican en ese lado.

1.3 Estructura cristalina de los metales

Cuando los metales se solidifican a partir de un estado fundido (capítulo 10), los átomos se organizan en varias configuraciones ordenadas, llamadas **crisales**; esta disposición atómica se denomina **estructura de cristal** o **estructura cristalina**. El grupo más pequeño de átomos que muestra la **estructura de red** característica de un metal particular se conoce como **celda unitaria**.

A continuación se enumeran las tres disposiciones atómicas básicas en los metales:

1. **Cúbica centrada en el cuerpo (bcc)**, por sus siglas en inglés; hierro alfa, cromo, molibdeno, tantalio, tungsteno y vanadio.
2. **Cúbica centrada en las caras (fcc)**, por sus siglas en inglés; hierro gamma, aluminio, cobre, níquel, plomo, plata, oro y platino.
3. **Empaquetamiento hexagonal compacto (hcp)**, por sus siglas en inglés; berilio, cadmio, cobalto, magnesio, titanio alfa, zinc y circonio.

Estas estructuras se representan mediante las ilustraciones de las figuras 1.3 a 1.5, en las que cada esfera representa un átomo. En estas estructuras cristalinas, la distancia

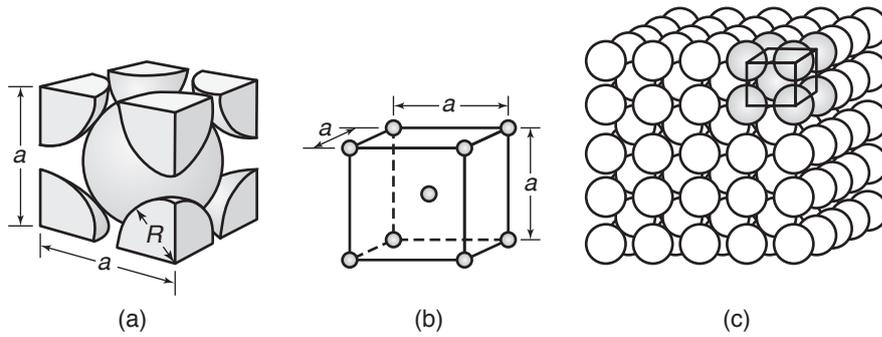


FIGURA 1.3 Estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (bcc): (a) modelo de esferas duras, (b) celda unitaria y (c) monocristal con muchas celdas unitarias.

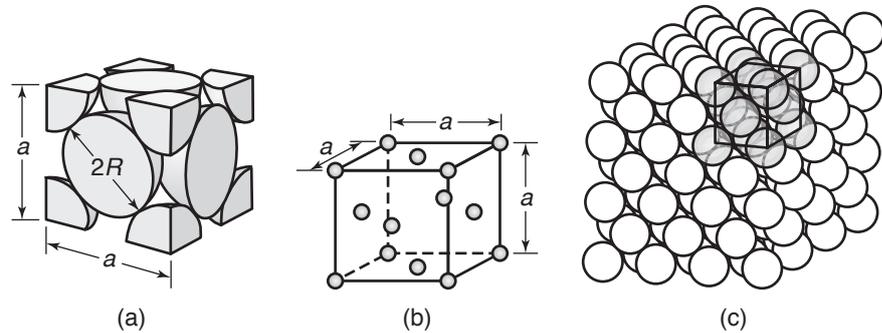


FIGURA 1.4 Estructura cristalina cúbica centrada en las caras (fcc): (a) modelo de esferas duras, (b) celda unitaria y (c) monocristal con muchas celdas unitarias.

entre los átomos es del orden de 0.1 nm (10^{-8} pulg). Los modelos mostrados se conocen como modelos de **bolas duras**, o de **esferas duras**, y pueden compararse con pelotas de tenis dispuestas en diversas configuraciones dentro de una caja.

En las tres estructuras ilustradas, los cristales hcp tienen las configuraciones más densamente empaquetadas, seguidos de los cristales fcc y bcc. En la estructura hcp, los planos superiores e inferiores se llaman **planos basales**. Las tres disposiciones pueden modificarse mediante la adición de átomos de algún otro metal o metales, lo cual se conoce como **aleación**, a menudo para mejorar diversas propiedades del metal.

La aparición de más de un tipo de estructura cristalina en los metales se conoce como **alotropismo** o **polimorfismo** (es decir, “muchas formas”). Debido a que las propiedades y el comportamiento de un metal particular dependen en gran medida de su estructura cristalina, el alotropismo es un factor importante en el tratamiento térmico de los metales, así como en las operaciones de conformado de lámina y de soldadura, las cuales se describen en las partes III y VI, respectivamente. En la actualidad, se producen monocristales de metal en forma de lingotes en tamaños del orden de 1 m (40 pulg) de largo y hasta 300 mm (12 pulg) de diámetro, con aplicaciones tales como álabes de turbina y semiconductores (vea la sección 11.5). No obstante, la mayoría de los metales que se usan en la manufactura son policristalinos, como se describe en la sección 1.5.

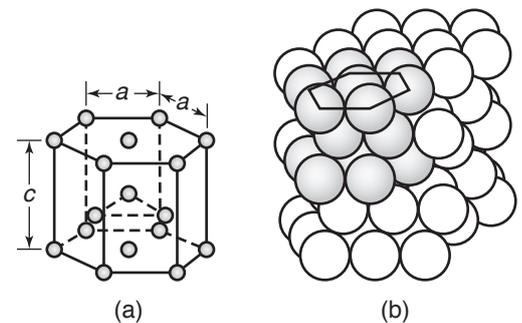


FIGURA 1.5 Estructura cristalina con empaquetado hexagonal compacto (hcp): (a) celda unitaria y (b) monocristal con muchas celdas unitarias.

1.4 Deformación y resistencia de los monocristales

Cuando un monocristal se somete a una fuerza externa, primero experimenta una **deformación elástica** (capítulo 2); es decir, regresa a su forma original cuando la fuerza se retira. Una analogía simple de este tipo de comportamiento es un resorte helicoidal que se extiende al aplicársele una carga y vuelve a su forma original cuando la carga se retira. Si la fuerza se aumenta lo suficiente, el cristal experimenta una **deformación plástica** o **deformación permanente**; es decir, no vuelve a su forma original cuando la fuerza se retira.

Existen dos mecanismos básicos mediante los cuales se presenta la deformación plástica en las estructuras cristalinas. Un mecanismo implica un plano de átomos que se desliza sobre un plano adyacente (llamado **plano de deslizamiento**) bajo un **esfuerzo cortante** (figura 1.6a); observe que este comportamiento es muy similar al deslizamiento de un naipe sobre otro en una baraja de cartas. El esfuerzo cortante se define como la razón de la fuerza cortante sobre el área de la sección transversal en la que se aplica.

De igual modo que se necesita cierta fuerza para deslizar los naipes uno sobre otro, un monocristal requiere cierta magnitud de esfuerzo cortante (llamado **esfuerzo cortante crítico**) para experimentar una deformación permanente. Por lo tanto, debe haber un esfuerzo cortante de magnitud suficiente para causar la deformación plástica, de lo contrario la deformación se mantiene elástica.

En la figura 1.6a, el esfuerzo cortante requerido para causar deslizamiento en los monocristales es directamente proporcional a la relación b/a , donde a es el espaciamiento de los planos atómicos y b es inversamente proporcional a la densidad atómica presente en el plano atómico. A medida que la relación b/a disminuye, el esfuerzo cortante requerido para producir un deslizamiento disminuye también. Por lo tanto, en un monocristal el deslizamiento se produce a lo largo de los planos que tienen *densidad*

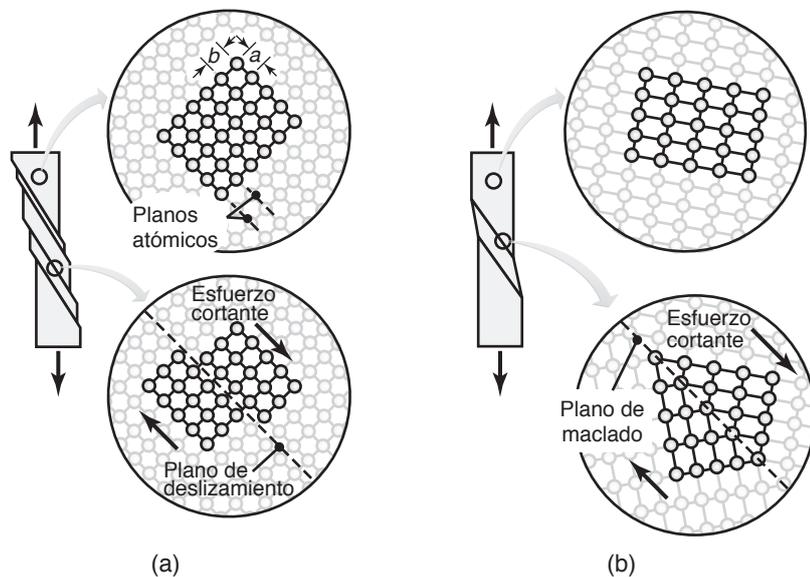


FIGURA 1.6 Deformación permanente de un monocristal bajo una carga de tensión; la malla de átomos resaltada enfatiza el movimiento que se produce dentro de la red. (a) Deformación por deslizamiento. La relación b/a influye en la magnitud del esfuerzo cortante requerido para causar deslizamiento. (b) Deformación por maclado que implica la generación de una “macla” en torno a una línea de simetría sometida a esfuerzo cortante. Observe que la carga de tensión resulta en un esfuerzo cortante en el plano ilustrado.

atómica máxima; en otras palabras, el deslizamiento se presenta en planos y en direcciones densamente empaquetados.

Debido a que la relación b/a varía para las diferentes direcciones dentro del cristal, un monocristal presenta características diferentes cuando se prueba en distintas direcciones, a esta propiedad se le llama **anisotropía**. Un ejemplo es el comportamiento de la madera contrachapada, que es mucho más fuerte en la dirección plana que en la dirección a lo largo de su espesor.

El segundo, y menos común, de los mecanismos de deformación plástica que ocurre en los cristales es el **maclado**, en el cual una parte del cristal forma una imagen especular de sí misma a través del *plano de maclado* (figura 1.6b). Las maclas se forman bruscamente y son la causa del sonido chirriante (llamado “chillido de metal”) que se produce cuando una varilla de estaño o de zinc se dobla a temperatura ambiente. El maclado suele ocurrir en los metales hcp.

Sistemas de deslizamiento. La combinación de un plano de deslizamiento y la dirección del deslizamiento se conoce como *sistema de deslizamiento*. En general, los metales con cinco o más sistemas de deslizamiento son dúctiles.

1. En los cristales **cúbicos centrados en el cuerpo**, hay 48 posibles sistemas de deslizamiento; por lo tanto, existe una alta probabilidad de que un esfuerzo cortante aplicado externamente opere en uno de estos sistemas y cause el deslizamiento. Sin embargo, debido a la relación b/a relativamente alta presente en este tipo de cristal, el esfuerzo cortante requerido es alto. Por lo general, los metales con estructuras bcc (como el titanio, el molibdeno y el tungsteno) tienen buena resistencia y ductilidad moderada, pero pueden tener una alta ductilidad a temperaturas elevadas.
2. En los cristales **cúbicos centrados en las caras** hay 12 sistemas de deslizamiento. La probabilidad de deslizamiento es moderada y el esfuerzo cortante requerido es bajo debido a una relación b/a relativamente baja. Por lo general, estos metales (como el aluminio, el oro, el cobre y la plata) tienen resistencia moderada y buena ductilidad.
3. El cristal con **empaquetamiento hexagonal compacto** posee tres sistemas de deslizamiento y, por lo tanto, tiene baja probabilidad de deslizamiento; sin embargo, a temperaturas elevadas se activan más sistemas de deslizamiento. Por lo general, los metales con estructuras hcp (como el berilio, el magnesio y el zinc) son frágiles a temperatura ambiente.

Observe en la figura 1.6a que las porciones del monocristal que se han deslizado han girado de su posición angular inicial hacia la dirección de la fuerza de tensión; vea también que el deslizamiento se presenta sólo a lo largo de ciertos planos. Mediante microscopía electrónica, es posible observar que lo que parece ser un único plano de deslizamiento es en realidad una **banda de deslizamiento** que consiste en una serie de planos de deslizamiento (figura 1.7).

1.4.1 Imperfecciones en la estructura cristalina de los metales

La resistencia real de los metales es aproximadamente de uno a dos órdenes de magnitud más bajos que los niveles de resistencia obtenidos a partir de cálculos teóricos. Esta discrepancia se explica en términos de los **defectos** y las **imperfecciones** que tienen lugar en la estructura cristalina. A diferencia de los modelos idealizados descritos anteriormente, los cristales

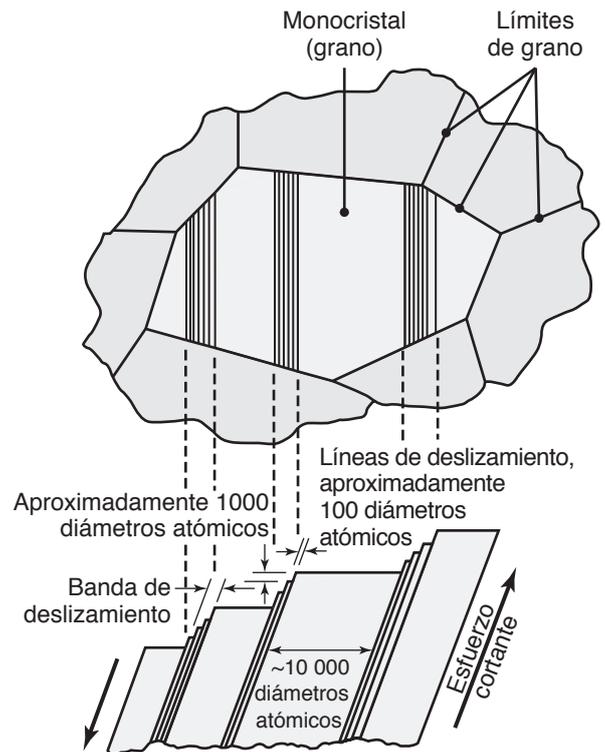


FIGURA 1.7 Ilustración esquemática de las líneas y las bandas de deslizamiento presentes en un monocristal (grano) sometido a esfuerzo cortante. Una banda de deslizamiento consiste en una serie de planos de deslizamiento. El cristal ubicado en el centro de la ilustración superior es un grano individual rodeado por otros granos diversos.

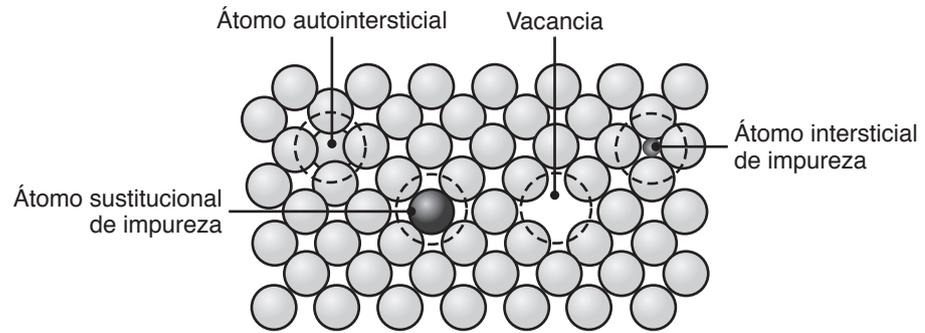


FIGURA 1.8 Ilustración esquemática de los tipos de defectos en una red de monocristal: autointersticial, vacancia, intersticial y sustitucional.

metálicos reales contienen un gran número de defectos e imperfecciones que suelen categorizarse de la manera siguiente:

1. *Defectos puntuales*, tal como una **vacancia** (átomo faltante), un **átomo intersticial** (átomo extra en la red) o una **impureza** (átomo externo que ha sustituido al átomo del metal puro) (figura 1.8).
2. *Defectos lineales, o unidimensionales*, llamados **dislocaciones** (figura 1.9).
3. *Imperfecciones planares, o bidimensionales*, como los **límites de grano** y las **fronteras de fase** (sección 1.5).
4. *Imperfecciones de volumen, o volumétricas*, como las **cavidades**, **inclusiones** (elementos no metálicos como los óxidos, sulfuros y silicatos), otras **fases** o **grietas**.

Las propiedades mecánicas y eléctricas de los metales, como el esfuerzo de cedencia, la resistencia a la fractura y la conductividad eléctrica se ven afectadas negativamente por la presencia de defectos; estas propiedades se conocen como **sensibles a la estructura**. En contraste, las propiedades físicas y químicas, como el punto de fusión, el calor específico, el coeficiente de dilatación térmica y las constantes elásticas, como el módulo de elasticidad y el módulo de rigidez (secciones 2.2.1 y 2.4), no son sensibles a los defectos; estas propiedades se conocen como **insensibles a la estructura**.

Dislocaciones. Las *dislocaciones*, observadas por primera vez en la década de 1930, son defectos en la disposición ordenada de la estructura atómica del metal. Debido a que un plano de deslizamiento que contiene una dislocación (figura 1.10) requiere un esfuerzo cortante mucho más bajo para permitir el deslizamiento que el requerido por un plano en una red perfecta, las dislocaciones son los defectos más importantes que explican la discrepancia entre las resistencias reales y teóricas de los metales.

Existen dos tipos de dislocaciones: **de borde** y **en tornillo** (figura 1.9). Una analogía con el movimiento de una dislocación de borde es el avance de una lombriz de tierra, que se mueve hacia adelante por medio de una joroba que inicia en la cola y se desplaza hacia la cabeza. Otra analogía es el movimiento de una gran alfombra sobre el piso al formarse una joroba en un extremo y llevar la joroba gradualmente hasta el otro extremo. (Recuerde que la fuerza requerida para mover una alfombra de esta manera es mucho menor que la requerida para deslizar toda la longitud de la alfombra por el piso). Las dislocaciones en tornillo se llaman así porque los planos atómicos forman una rampa en espiral, de igual modo que las roscas de un tornillo o perno.

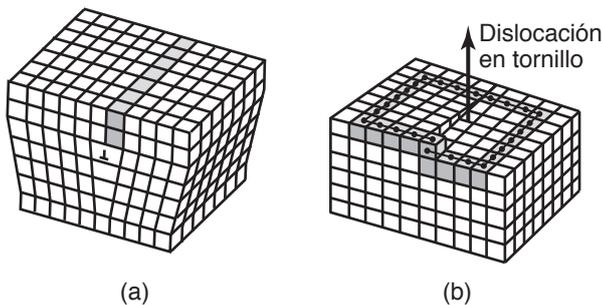


FIGURA 1.9 Tipos de dislocaciones en un monocristal: (a) dislocación de borde y (b) dislocación en tornillo.

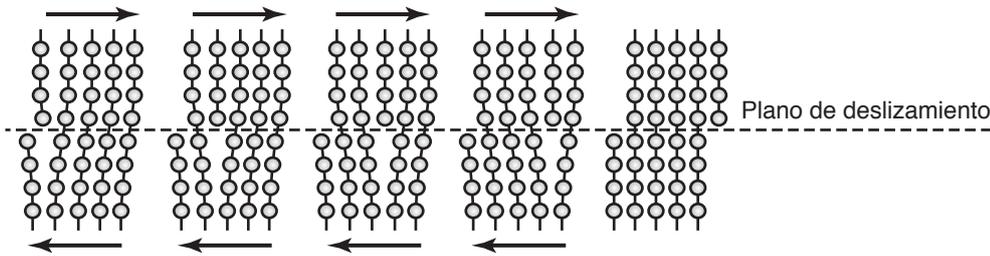


FIGURA 1.10 Movimiento de una dislocación de borde a través de la red cristalina bajo un esfuerzo cortante. Las dislocaciones ayudan a explicar por qué la resistencia real de los metales es mucho menor que la predicha en forma teórica.

1.4.2 Endurecimiento por trabajo (endurecimiento por deformación)

Aunque la presencia de una dislocación reduce el esfuerzo cortante requerido para causar deslizamiento, las dislocaciones pueden:

1. Enmarañarse e interferir entre sí.
2. Quedar restringidas por barreras, como los límites de grano, impurezas e inclusiones en el material.

Un mayor esfuerzo cortante requerido para superar los enmarañamientos y los obstáculos resulta en un incremento de la resistencia y la dureza del metal, esto se conoce como **endurecimiento por trabajo** o **endurecimiento por deformación**. Cuanto mayor sea la deformación, mayor será el número de enmarañamientos y, por lo tanto, mayor será el aumento de la resistencia del metal. El endurecimiento por trabajo es un mecanismo que se utiliza ampliamente para el reforzamiento de metales en los procesos de formado de metales a temperaturas bajas y moderadas. Los ejemplos más comunes son la producción de láminas metálicas para carrocerías de automóviles y fuselajes de aviones por laminación en frío (capítulo 13), la producción de cabezas para pernos mediante el forjado (capítulo 14) y el reforzamiento de alambres por medio de la reducción de su sección transversal al trefilarlos con un dado (capítulo 15).

1.5 Granos y límites de grano

Cuando una masa de metal fundido comienza a solidificarse, los cristales se forman de manera independiente entre sí en varios lugares dentro de la masa líquida y, por lo tanto, tienen orientaciones aleatorias y no relacionadas (figura 1.11). Cada uno de estos cristales crece eventualmente en una estructura cristalina, o *grano*; cada grano consiste en un solo cristal (para los metales puros) o en un agregado policristalino (para las aleaciones).

El número y tamaño de los granos desarrollados en una unidad de volumen del metal dependen de la *velocidad* o *rapidez* a la que se produce la **nucleación** (la etapa inicial de la formación de cristales). El *tamaño medio* de los granos desarrollados depende de (a) el número de sitios diferentes en los que los cristales individuales comienzan a formarse (observe que en la figura 1.11a hay siete) y (b) la velocidad a la que estos cristales crecen. Si la velocidad de nucleación es alta, el número de granos en una unidad de volumen de metal será grande y, por lo tanto, el tamaño de grano será pequeño. Por el contrario, si la velocidad de crecimiento de los cristales es alta (en comparación con su velocidad de nucleación), habrá un menor número de granos por unidad de volumen y, por consiguiente, el tamaño de grano será más grande. En general, el enfriamiento rápido produce granos más pequeños, mientras que un enfriamiento lento produce granos más grandes.

En la figura 1.11d observe que los granos en crecimiento eventualmente interfieren e inciden entre sí; las interfaces que separan los granos individuales se denominan **límites de grano**. Vea también que la orientación cristalográfica cambia bruscamente de un grano al siguiente a través de los límites de grano. Recuerde, de la sección 1.4, que el comporta-

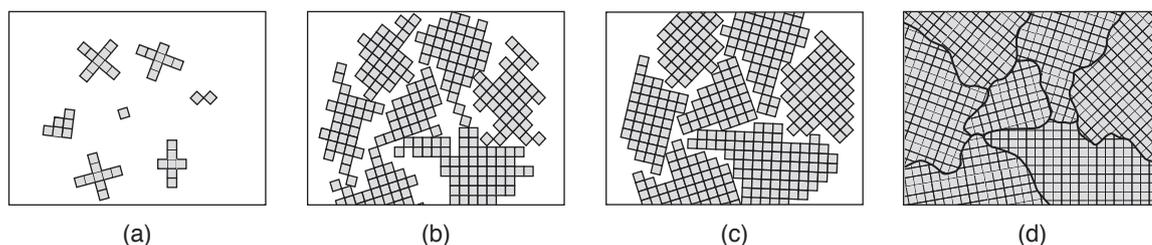


FIGURA 1.11 Ilustración esquemática de las etapas que tienen lugar durante la solidificación de metal fundido; cada pequeño cuadrado representa una célula unitaria. (a) Nucleación de cristales en sitios aleatorios en el metal fundido; observe que la orientación cristalográfica de cada sitio es diferente. (b) y (c) Crecimiento de los cristales a medida que continúa la solidificación. (d) Metal solidificado mostrando los granos individuales y los límites de grano; observe los diferentes ángulos que los granos vecinos describen entre sí.

miento de un monocristal o de un solo grano es anisotrópico. Por lo tanto, debido a que la gran cantidad de granos tienen orientaciones cristalográficas aleatorias, el comportamiento de un metal policristalino es esencialmente **isotrópico**; es decir, sus propiedades no varían con la dirección.

1.5.1 Tamaño de grano

El **tamaño del grano** tiene una influencia importante en las propiedades mecánicas de los metales. Por ejemplo, a temperatura ambiente, un tamaño grande del grano suele asociarse con baja resistencia, baja dureza y baja ductilidad. Los granos pueden ser tan grandes como para poder observarlos a simple vista; los granos de zinc sobre la superficie de las láminas de acero galvanizadas son un ejemplo. Los granos grandes también causan un aspecto áspero en la superficie después de que el material se ha deformado de manera plástica, particularmente en el estiramiento de láminas metálicas (vea **piel de naranja** en la sección 1.7).

La resistencia a la cedencia, Y , del metal es la propiedad más sensible y se relaciona con el tamaño del grano mediante la siguiente fórmula empírica (conocida como *ecuación de Hall-Petch*):

$$Y = Y_i + kd^{-1/2}, \quad (1.1)$$

donde Y_i es el esfuerzo de cedencia para un material con grano grande, k es una constante y d es el diámetro medio de grano. La ecuación (1.1) es válida por debajo de la temperatura de recristalización del material.

Por lo general, el tamaño del grano se mide contando el número de granos presente en un área dada, o contando el número de granos que cruzan una longitud prescrita de una línea trazada aleatoriamente sobre una fotografía ampliada de los granos (tomada con un microscopio en un espécimen pulido y atacado químicamente). El tamaño del grano también se puede determinar al comparar dicha fotografía contra un patrón estándar.

El número ASTM (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales) del tamaño de grano, n , se relaciona con el número de granos, N , existentes por pulgada cuadrada con una magnificación de $100 \times$ (igual a 0.0645 mm^2 de área real) mediante la fórmula

$$N = 2^{n-1}. \quad (2)$$

Debido a que los granos suelen ser muy pequeños, muchos de ellos pueden ocupar un volumen muy pequeño del metal (tabla 1.1). Los tamaños de grano ubicados entre 5 y 8 se consideran generalmente de grano fino. Un tamaño de grano 7 suele ser aceptable para las láminas metálicas usadas en la fabricación de carrocerías de automóvil, electrodomésticos y utensilios de cocina (capítulo 16).

TABLA 1.1

Tamaños de grano		
Núm. ASTM	Granos/mm ²	Granos/mm ³
-3	1	0.7
-2	2	2
-1	4	5.6
0	8	16
1	16	45
2	32	128
3	64	360
4	128	1020
5	256	2900
6	512	8200
7	1024	23 000
8	2048	65 000
9	4096	185 000
10	8200	520 000
11	16 400	1 500 000

EJEMPLO 1.1 Número de granos en un clip para papel

Dado: Un clip para papel está hecho con un alambre de 120 mm de longitud y 0.75 mm de diámetro, con un tamaño de grano ASTM de 9.

Se solicita: Calcular el número de granos presentes en el clip.

Respuesta: Un metal con un tamaño de grano ASTM de 9 tiene 185 000 granos por mm^3 (vea la tabla 1.1). El volumen del clip es

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 l = \frac{\pi}{4} (0.75)^2 (120) = 53.0 \text{ mm}^3.$$

El número total de granos se calcula multiplicando el volumen por los granos que hay en cada mm^3 , o

$$\begin{aligned} \text{Núm. de granos} &= (53.0 \text{ mm}^3)(185\,000 \text{ granos/mm}^3) \\ &= 9.81 \text{ millones.} \end{aligned}$$

1.5.2 Influencia de los límites de grano

Los límites de grano tienen una influencia importante sobre la resistencia y la ductilidad de los metales; interfieren con el movimiento de dislocación y, por lo tanto, también influyen en el endurecimiento por deformación. La magnitud de estos efectos depende de la temperatura, la velocidad de deformación y el tipo y cantidad de impurezas presentes a lo largo de los límites de grano.

Debido a que los átomos que se encuentran a lo largo de los límites de grano están más desordenados y, por ende, empaquetados con menos eficiencia, los límites de grano son más reactivos que los propios granos. Como resultado, los límites tienen menor energía que los átomos en la red ordenada dentro de los granos, por lo que pueden eliminarse o enlazarse químicamente a otro átomo con mayor facilidad. Debido a lo anterior, la superficie de una pieza de metal, por ejemplo, se vuelve más áspera cuando se ataca químicamente o se somete a ambientes corrosivos (vea también *granos finales en el forjado*, en la sección 4.11).

A temperaturas elevadas, y en metales cuyas propiedades dependen de la velocidad a la que se deforman, la deformación plástica también se lleva a cabo por medio del deslizamiento de los límites de grano. El mecanismo de termofluencia (deformación bajo esfuerzo en el tiempo, generalmente a temperaturas elevadas) implica un *deslizamiento de los límites de grano* (sección 2.8).

Fragilización de los límites de grano. Cuando un metal normalmente dúctil y fuerte se expone a metales con bajo punto de fusión, puede agrietarse al someterlo a esfuerzos externos muy bajos. Dos ejemplos de este tipo de comportamiento son: (a) aluminio humectado con una amalgama de mercurio-zinc o con galio líquido y (b) cobre a temperatura elevada humectado con plomo o bismuto; estos elementos debilitan los límites de grano del metal mediante **fragilización**. El término **fragilización por metal líquido** se utiliza para describir tales fenómenos porque el elemento de fragilización se encuentra en estado líquido. Sin embargo, la fragilización también puede ocurrir a temperaturas muy por debajo del punto de fusión del elemento de fragilización, fenómeno conocido como **fragilización por metal sólido**.

Otro fenómeno de fragilización, llamado **fragilidad en caliente**, es causado por la fusión local de un componente o de una impureza a lo largo del límite de grano a una temperatura por debajo del punto de fusión del propio metal. Cuando una pieza de metal se somete a deformación plástica a temperaturas elevadas (*trabajo en caliente*), se desmorona a lo largo de sus límites de grano; algunos ejemplos de esto son: (a) el antimonio en cobre, (b) los aceros al plomo (sección 21.7.1) y (c) el latón al plomo. Para evitar la fragilidad en caliente, con frecuencia el metal se trabaja a una temperatura baja para evitar el reblandecimiento y la fusión a lo largo de los límites de grano. La **fragilización por revenido** en los aceros aleados es otra forma de fragilización causada por la segregación (movimiento) de impurezas hacia los límites de grano (sección 4.11).

1.6 Deformación plástica de los metales policristalinos

Cuando un metal policristalino con *granos equiaxiales* uniformes (granos que tienen dimensiones iguales en todas las direcciones) se somete a deformación plástica a temperatura ambiente (proceso llamado *trabajo en frío*), los granos se deforman y alargan, como se muestra esquemáticamente en la figura 1.12. La deformación puede llevarse a cabo, por ejemplo, mediante la compresión de la pieza de metal, como se hace en una operación de forjado para fabricar un disco de turbina (capítulo 14) o al someter la pieza a tensión, como se hace en el formado por estiramiento de láminas metálicas (sección 16.6). Dentro de cada grano, la deformación ocurre por acción de los mecanismos descritos en la sección 1.4 para un monocristal.

Durante la deformación plástica, los límites de grano permanecen intactos y se mantiene la continuidad de la masa. El metal deformado exhibe mayor resistencia debido al enmarañamiento de las dislocaciones con los límites de grano y entre ellas mismas. El aumento de la resistencia depende del grado de deformación (*tensión*) a la que se somete el metal; entre mayor sea la deformación, más resistente se volverá el metal. La resistencia es mayor para los metales con granos más pequeños debido a que tienen un área superficial del límite de grano más grande por unidad de volumen de metal y, por lo tanto, poseen mayor enmarañamiento de las dislocaciones.

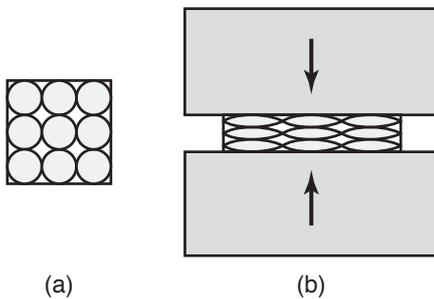


FIGURA 1.12 Deformación plástica de granos idealizados (equiaxiales) en un espécimen sometido a compresión (tal como ocurre en el forjado o laminado de metales): (a) antes de la deformación y (b) después de la deformación. Observe la alineación de los límites de grano a lo largo de la dirección horizontal, un efecto conocido como *orientación preferida*.

Anisotropía (textura). En la figura 1.12b observe que, como resultado de la deformación plástica, los granos se han alargado en una dirección y se han contraído en la otra. Por consiguiente, esta pieza de metal se ha vuelto *anisotrópica* y, por lo tanto, en la dirección vertical sus propiedades son diferentes de aquellas presentes en la dirección horizontal. El grado de anisotropía depende de la temperatura a la que ocurre la deformación y de qué tan uniformemente se ha deformado el metal. Observe, con base en la dirección de la grieta de la figura 1.13, que la ductilidad de la hojalata laminada en frío en la dirección transversal es menor que en su dirección de laminado (vea también la sección 16.5).

La anisotropía influye en las propiedades mecánicas y físicas de los metales que se describen en el capítulo 3. Por ejemplo, la chapa de acero para transformadores eléctricos se lamina de tal manera que la deformación resultante imparte propiedades magnéticas anisotrópicas a la placa. Esta operación reduce las pérdidas por histéresis magnética y, por lo tanto, mejora la

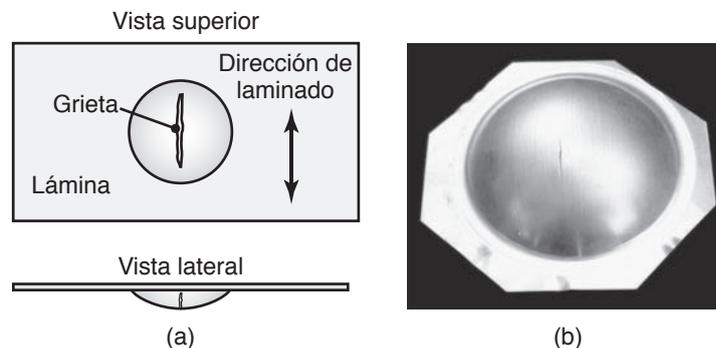


FIGURA 1.13 (a) Ilustración esquemática de una grieta en una lámina metálica que ha sido sometida a abombamiento (causado, por ejemplo, al empujar una bola de acero contra la lámina). Observe la orientación de la grieta con respecto a la dirección de la laminación; esta lámina es anisotrópica. (b) Lámina de aluminio con una grieta (línea oscura vertical en el centro) desarrollada en una prueba de abombamiento; la dirección de laminado era vertical. *Fuente:* Cortesía de J. S. Kallend, Illinois Institute of Technology.

eficiencia de los transformadores. (Vea también *aleaciones amorfas* en la sección 6.14). Existen dos tipos generales de anisotropía en los metales: la orientación preferida y la formación mecánica de fibras.

Orientación preferida. También llamada **anisotropía cristalográfica**, la *orientación preferida* puede describirse de mejor manera con referencia a la figura 1.6a. Cuando una pieza de metal monocristalino se somete a tensión, los bloques de deslizamiento giran en la dirección de la fuerza de tensión y, como resultado, los planos de deslizamiento y las bandas de deslizamiento tienden a alinearse en la dirección general de la deformación. De igual modo, para un metal policristalino con granos en orientaciones aleatorias, todas las direcciones de deslizamiento tienden a alinearse en la dirección de la fuerza de tensión. Por el contrario, los planos de deslizamiento bajo compresión tienden a alinearse en una dirección perpendicular a la dirección de la fuerza de compresión.

Formación mecánica de fibras. Éste es un tipo de anisotropía que resulta de la alineación de las inclusiones (*bandas*), impurezas y vacancias en el metal durante la deformación. Observe que si los granos esféricos de la figura 1.12a se recubrieran con impurezas, estas impurezas podrían alinearse en una dirección generalmente horizontal después de la deformación. Debido a que las impurezas debilitan los límites de grano, ahora esta pieza de metal será más débil y menos dúctil cuando se pruebe en la dirección vertical. Como una analogía, considere la madera contrachapada, que es resistente a la tensión a lo largo de su dirección planar, pero se parte fácilmente cuando se somete a tensión en la dirección de su espesor.

1.7 Recuperación, recristalización y crecimiento del grano

Recuerde que la deformación plástica a temperatura ambiente causa (a) distorsión de los granos y de los límites de grano, lo que conduce a un comportamiento anisotrópico, (b) aumento general de la resistencia y (c) disminución de la ductilidad. Estos efectos pueden invertirse y las propiedades del metal pueden llevarse de nuevo a sus niveles originales mediante el calentamiento del metal a un rango de temperatura específico durante un periodo determinado—proceso denominado **recocido** (se describe con detalle en la sección 4.11). Durante el proceso de recocido, ocurren tres eventos de manera consecutiva:

1. **Recuperación.** Durante la *recuperación*, que se produce en un determinado rango de temperatura por debajo de la **temperatura de recristalización** del metal (que se describe a continuación), se alivian los esfuerzos en las regiones altamente deformadas del metal. Comienzan a formarse límites de subgrano (lo que se conoce como **poligonización**) sin que se presente ningún cambio significativo en las propiedades mecánicas como dureza y resistencia (figura 1.14).
2. **Recristalización.** Este es el proceso en el que, dentro de cierto rango de temperatura, se forman nuevos granos equiaxiales y libres de esfuerzos, en sustitución de los granos más antiguos. La temperatura requerida para la recristalización oscila aproximadamente entre 0.3 y 0.5 T_m , donde T_m es el punto de fusión del metal en la escala absoluta.

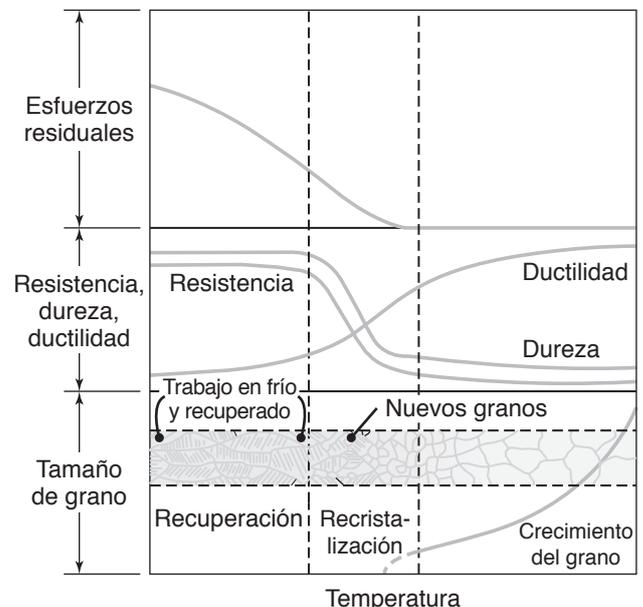


FIGURA 1.14 Ilustración esquemática de los efectos de la recuperación, la recristalización y el crecimiento del grano en las propiedades mecánicas y en la forma y el tamaño de los granos; observe la formación de pequeños nuevos granos durante la recristalización. Fuente: Según G. Sachs.

Por lo general, la temperatura de recristalización se define como la temperatura a la que se produce la recristalización completa dentro de un margen aproximado de una hora. La recristalización disminuye la densidad de las dislocaciones, aminora la resistencia y aumenta la ductilidad del metal (figura 1.14). El plomo, el estaño, el cadmio y el zinc se recristalizan aproximadamente a temperatura ambiente y, en consecuencia, normalmente no se endurecen.

La temperatura de recristalización depende del grado previo de trabajo en frío (endurecimiento por trabajo): cuanto más trabajo en frío se haya realizado, menor será la temperatura requerida para la recristalización. La razón es que, a medida que aumenta la cantidad de trabajo en frío, el número de dislocaciones y, por lo tanto, la cantidad de energía almacenada en las dislocaciones (**energía almacenada**) también aumentan. Esta energía proporciona algo del trabajo necesario para la recristalización. La recristalización también depende del tiempo ya que involucra **difusión** —el movimiento e intercambio de átomos a través de los límites de grano.

Los efectos de la temperatura, el tiempo y la deformación plástica por el trabajo en frío sobre la recristalización son:

- a. Para una cantidad constante de deformación por trabajo en frío, el tiempo requerido para la recristalización disminuye al aumentar la temperatura.
 - b. Cuanto mayor sea el trabajo previo en frío, menor será la temperatura requerida para la recristalización.
 - c. Cuanto mayor sea la cantidad de deformación, más pequeño se volverá el tamaño de grano durante la recristalización; este efecto es un método que se usa comúnmente para convertir una estructura de grano grueso a una con un grano más fino y, por lo tanto, con mejores propiedades.
 - d. Por lo general, cierta cantidad de anisotropía debida a la orientación preferida persiste después de la recristalización; para restaurar la isotropía, puede necesitarse una temperatura más alta que la requerida para la recristalización.
3. **Crecimiento de grano.** Si la temperatura se eleva todavía más, los granos comienzan a crecer (vea la parte inferior de la figura 1.14) y, con el tiempo, su tamaño puede sobrepasar el tamaño de grano original; este fenómeno, llamado *crecimiento de grano*, afecta negativamente las propiedades mecánicas (figura 1.14). Los granos grandes también producen una apariencia rugosa en la superficie de las hojas metálicas, llamada **piel de naranja**, cuando se estiran para formar una pieza, o en las superficies de una pieza metálica cuando se somete a una deformación mayor, como en la compresión del forjado.

1.8 Trabajo en frío, trabajo en tibio y trabajo en caliente

El **trabajo en frío** se refiere a la deformación plástica que suele llevarse a cabo a temperatura ambiente; cuando la deformación se produce por encima de la temperatura de recristalización, se llama **trabajo en caliente**. “Frío” y “caliente” son términos relativos, como puede verse por el hecho de que la deformación del plomo a temperatura ambiente es un proceso de trabajo en caliente debido a que la temperatura de recristalización del plomo es aproximadamente la temperatura ambiente. Tal como implica su nombre, el **trabajo en tibio** se lleva a cabo a temperaturas intermedias; por lo tanto, el trabajo en tibio es un punto medio entre el trabajo en frío y en caliente. Las diferencias tecnológicas importantes de los productos que se procesan mediante trabajo en frío, trabajo en tibio y trabajo en caliente se describen en la parte III de este texto.

Los rangos de temperatura para estas tres categorías de deformación plástica se dan en la tabla 1.2 en términos de una relación, T/T_m , donde T es la temperatura de trabajo y T_m es el punto de fusión del metal, ambos en escala absoluta. A pesar de que es una cantidad adimensional, esta relación se conoce como **temperatura homóloga**.

TABLA 1.2

Rangos de temperatura homólogos para varios procesos	
Proceso	T/T_m
Trabajo en frío	<0.3
Trabajo en tibio	0.3-0.5
Trabajo en caliente	>0.6

RESUMEN

- En los metales existen tres estructuras cristalinas básicas: cúbica centrada en el cuerpo (bcc), cúbica centrada en las caras (fcc) y empaquetamiento hexagonal compacto (hcp). Por lo general, los granos formados a partir de estos cristales contienen diversos defectos e imperfecciones, como dislocaciones, vacancias, impurezas, inclusiones y límites de grano. Los metales policristalinos se componen de muchos cristales, o granos, presentes en orientaciones aleatorias.
- La deformación plástica de los metales se lleva a cabo mediante un mecanismo de deslizamiento. Aunque en teoría el esfuerzo cortante requerido para causar el deslizamiento es muy alto, los esfuerzos reales son mucho más bajos debido a la presencia de dislocaciones (de borde o en tornillo). Las dislocaciones se enmarañan o se ven obstaculizadas por barreras como límites de grano, impurezas o inclusiones. Como resultado, el esfuerzo cortante requerido para causar el deslizamiento se incrementa; por consiguiente, también aumenta la resistencia y la dureza del metal (mediante endurecimiento por trabajo o endurecimiento por deformación).
- El tamaño de grano tiene un efecto significativo en la resistencia de los metales: cuanto menor sea el tamaño, más fuerte será el metal, y cuanto mayor sea el tamaño, más dúctil será el metal; sin embargo, los granos excesivamente grandes suelen asociarse con un comportamiento frágil.
- Los límites de grano tienen una gran influencia en el comportamiento de los metales. Estos límites pueden experimentar fragilización, lo que reduce seriamente la ductilidad a temperaturas elevadas (fragilidad en caliente); también son responsables del fenómeno de termofluencia que se debe al deslizamiento de los límites de grano.
- Los metales pueden deformarse plásticamente a temperatura ambiente, a temperaturas tibias o a temperaturas altas; su comportamiento y facilidad de trabajo dependen en gran medida de si la deformación ocurre por debajo o por encima de la temperatura de recristalización del metal. La deformación a temperatura ambiente (trabajo en frío) resulta en mayor resistencia, pero reduce la ductilidad y, por lo general, también causa anisotropía (orientación preferida o formación mecánica de fibras), así que las propiedades son diferentes en las distintas direcciones.
- Los efectos del trabajo en frío pueden revertirse mediante el recocido del metal; es decir, al calentarlo dentro de cierto rango de temperatura durante un periodo dado, esto permite que ocurran los procesos sucesivos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano.

TÉRMINOS CLAVE

Alotropismo	Endurecimiento por deformación	Fragilización	Recristalización
Anisotropía	Endurecimiento por trabajo	Fuerza de van der Waals	Recuperación
Banda de deslizamiento	Enlace covalente	Granos	Sistema de deslizamiento
Celda unitaria	Enlace iónico	Imperfecciones	Tamaño de grano
Crecimiento de grano	Enlace metálico	Límites de grano	Temperatura homóloga
Cristales	Enlace primario	Maclado	Termofluencia
Cúbica centrada en el cuerpo	Enlace secundario	Nucleación	Textura
Cúbica centrada en las caras	Esfuerzo cortante	Orientación preferida	Trabajo en caliente
Deformación elástica	Estructura en red	Piel de naranja	Trabajo en frío
Deformación plástica	Estructura insensible	Plano basal	Trabajo en tibio
Dislocaciones	Estructura sensible	Plano de deslizamiento	Vacancia
Ecuación de Hall-Petch	Formación mecánica de fibras	Policristalino	
Empaquetamiento hexagonal compacto	Fragilidad en caliente	Poligonización	
		Polimorfismo	

BIBLIOGRAFÍA

- Ashby, M. F., *Materials Selection in Mechanical Design*, 4a. ed., Butterworth-Heinemann, 2010.
- Ashby M. F. y Jones, D. R. H., *Engineering Materials*, Vol. 1, *An Introduction to Properties, Applications, and Microstructure*, 4a. ed., 2012; Vol. 2: *An Introduction to Microstructures and Processing*. Butterworth-Heinemann, 2012.
- Ashby M., Shercliff, H. y Cebon, D., *Materials: Engineering, Science, Processing and Design*, 2a. ed., Butterworth-Heinemann, 2009.

- Askeland, D. R., Fulay, P. P. y Wright, W. J., *The Science and Engineering of Materials*, 6a. ed., CL Engineering, 2010.
- Callister, W. D., Jr. y Rethwisch, D. G., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8a. ed., Wiley, 2010.
- Shackelford, J. F., *Introduction to Materials Science for Engineers*, 7a. ed., Prentice Hall, 2008.

PREGUNTAS DE REPASO

- 1.1** ¿Cuál es la diferencia entre un átomo y una molécula? ¿Entre una molécula y un cristal?
- 1.2** Describa los enlaces iónico, covalente y metálico.
- 1.3** Explique la diferencia entre una celda unitaria y un monocristal.
- 1.4** En las tablas sobre las estructuras cristalinas, el hierro aparece con una estructura bcc y también con una estructura fcc. ¿Por qué?
- 1.5** Defina anisotropía. ¿Cuál es su importancia?
- 1.6** ¿Qué efectos tiene la recristalización en las propiedades de los metales?
- 1.7** ¿Qué es el endurecimiento por deformación y qué efectos tiene sobre las propiedades de los metales?
- 1.8** Explique lo que significan las propiedades de los metales con estructura sensible y estructura insensible.
- 1.9** Haga una lista de los principales tipos de imperfecciones que tienen lugar en la estructura cristalina de los metales y descríbalos.
- 1.10** ¿Qué influencia tiene el tamaño de grano sobre las propiedades mecánicas de los metales?
- 1.11** ¿Cuál es la relación entre la velocidad de nucleación y el número de granos por unidad de volumen de un metal?

- 1.12** ¿Qué es un sistema de deslizamiento y en qué reside su importancia?
- 1.13** Explique la diferencia entre recuperación y recristalización.
- 1.14** ¿Qué es la fragilidad en caliente y en qué reside su importancia?
- 1.15** Explique las ventajas y limitaciones del trabajo en frío, en tibio y en caliente, respectivamente.
- 1.16** Describa qué es el efecto de piel de naranja. Explique por qué podríamos preocuparnos por un efecto de piel de naranja en las superficies metálicas.
- 1.17** Algunos metales, como el plomo, no se vuelven más fuertes cuando se trabajan a temperatura ambiente. Explique la razón.
- 1.18** Describa la diferencia entre orientación preferida y formación mecánica de fibras.
- 1.19** Establezca la diferencia entre relajación del esfuerzo y alivio del esfuerzo.
- 1.20** ¿Qué es un maclado? ¿Cómo se diferencia del deslizamiento?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 1.21** Explique lo que usted comprende acerca de por qué es importante el estudio de la estructura cristalina de los metales.
- 1.22** ¿Por qué es importante que algunos metales experimentan alotropismo?
- 1.23** ¿Es posible que dos piezas del mismo metal tengan diferentes temperaturas de recristalización? ¿Es posible que la recristalización se presente en algunas regiones de una pieza antes de ocurrir en otras zonas de la misma pieza? Explique su respuesta.
- 1.24** Describa lo que usted comprende acerca de por qué las diferentes estructuras cristalinas presentan distintas resistencias y ductilidades.
- 1.25** Una pieza metálica trabajada en frío se ha recristalizado. Al probarla, se encuentra que es anisotrópica. Explique la razón probable.
- 1.26** ¿Qué materiales y estructuras (diferentes a los metales) puede nombrar usted y que exhiban un comportamiento anisotrópico?

- 1.27** Se hicieron dos piezas del mismo material, una de ellas se formó mediante trabajo en frío y la otra por trabajo en caliente. Explique las diferencias que podrían observarse entre las dos piezas.
- 1.28** ¿Cree usted que podría ser importante saber si una materia prima que se utiliza en un proceso de manufactura tiene propiedades anisotrópicas? ¿Qué se podría decir sobre la anisotropía en el producto final? Explique su respuesta.
- 1.29** Explique por qué la resistencia de un metal policristalino a temperatura ambiente disminuye a medida que aumenta su tamaño de grano.
- 1.30** Describa la técnica que se utiliza para reducir el efecto de la piel de naranja en la superficie de las piezas.
- 1.31** ¿Cuál es la importancia de que metales como el plomo y el estaño tengan una temperatura de recristalización aproximadamente igual a la temperatura ambiente?

1.32 En este capítulo se señaló que el maclado suele ocurrir en los materiales hcp, pero la figura 1.6b muestra maclado en una disposición rectangular de átomos. ¿Puede explicar usted la discrepancia?

1.33 Se ha observado que cuanto más se trabaje en frío un metal, menor será su endurecimiento por deformación. Explique por qué sucede esto.

1.34 ¿Es posible trabajar en frío un metal a temperaturas por encima del punto de ebullición del agua? Explique su respuesta.

1.35 Comente sus observaciones en relación con la figura 1.14.

1.36 ¿Es posible que un metal sea completamente isotrópico? Explique su respuesta.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

1.37 ¿Cuántos átomos hay en una sola celda de repetición de una estructura cristalina fcc? ¿Cuántos hay en una celda de repetición de una estructura hcp?

1.38 El peso atómico del cobre es de 63.55, lo que significa que 6.023×10^{23} átomos pesan 63.55 g. La densidad del cobre es de 8970 kg/m^3 y el cobre puro forma cristales fcc. Estime el diámetro de un átomo de cobre.

1.39 Grafique los datos de la tabla 1.1 en términos de granos/ mm^2 contra granos/ mm^3 y comente sus observaciones.

1.40 El espesor de una tira de metal se reduce de 30 mm a 20 mm mediante trabajo en frío; una tira similar se redujo de 40 mm a 30 mm. ¿Cuál de estas tiras trabajadas en frío se recristaliza a una menor temperatura? ¿Por qué?

1.41 La bola de un bolígrafo tiene 1 mm de diámetro y tamaño de grano ASTM de 10. ¿Cuántos granos hay en la bola?

1.42 ¿Cuántos granos hay en la superficie de la cabeza de un alfiler? Suponga que la cabeza de un alfiler es esférica, con un diámetro de 1 mm y tiene un tamaño de grano ASTM de 12.

1.43 Las celdas unitarias mostradas en las figuras 1.3 a 1.5 pueden representarse mediante pelotas de tenis dispuestas en diversas configuraciones dentro de una caja. En una disposición de ese tipo, el *factor de empaquetamiento atómico* (APF, por sus siglas en inglés) se define como la relación de la suma de los volúmenes de los átomos sobre el volumen de la celda unitaria. Demuestre que el APF es de 0.68 para la estructura bcc y de 0.74 para la estructura fcc.

1.44 Demuestre que la constante de red a mostrada en la figura 1.4a se relaciona con el radio atómico mediante la fórmula $a = 2\sqrt{2}R$, donde R es el radio del átomo según lo representado por el modelo de pelotas de tenis.

1.45 Demuestre que, para la celda unitaria fcc, el radio r del intersticio más grande está dado por $r = 0.414R$. Determine el tamaño del intersticio más grande para los átomos de hierro en la estructura fcc.

1.46 Un técnico determina que el tamaño de grano de cierto espécimen atacado químicamente es 8. Tras una posterior com-

probación, se encuentra que la ampliación usada fue de $125\times$, en vez de $100\times$ que es la requerida por las normas ASTM. Determine el tamaño de grano correcto.

1.47 Si el diámetro del átomo de aluminio es de 0.28 nm, ¿cuántos átomos hay en un grano con tamaño de grano ASTM 8?

1.48 Los siguientes datos se obtienen en las pruebas de tensión del latón:

Tamaño de grano (μm)	Esfuerzo de cedencia (MPa)
15	150
20	140
50	105
75	90
100	75

¿El material cumple con la ecuación de Hall-Petch? Si es así, ¿cuál es el valor de k ?

1.49 Suponga que se le pide presentar un problema cuantitativo para una prueba rápida. Prepare la pregunta y proporcione su respuesta.

1.50 El radio atómico del hierro es de 0.125 nm, mientras que el de un átomo de carbono es de 0.070 nm. ¿Puede un átomo de carbono caber dentro de una estructura de acero bcc sin distorsionar los átomos vecinos?

1.51 Estime el radio atómico teniendo en cuenta los siguientes materiales y datos: (a) Aluminio (peso atómico = 26.98 g/mol, densidad = 2700 kg/m^3), (b) tungsteno (peso atómico = 183.85 g/mol, densidad = $19\,300 \text{ kg/m}^3$) y (c) magnesio (peso atómico = 24.31 g/mol, densidad = 1740 kg/m^3).

1.52 Una estructura cúbica simple consiste en átomos situados en las esquinas del cubo que están en contacto entre sí a lo largo de las aristas del cubo. Haga un dibujo de una estructura cúbica simple y calcule su factor de empaquetamiento atómico.

1.53 Igual que el problema 1.39, pero considere el número ASTM contra granos/ mm^3 .

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

1.54 Si se alarga una tira delgada de metal pulido, como en una máquina de pruebas de tensión, demuestre y comente sobre lo que sucede con la reflexividad de la tira a medida que se extiende.

1.55 Describa algunas analogías con la formación mecánica de fibras —por ejemplo, capas de masa delgada rociadas con harina o mantequilla derretida entre cada capa.

1.56 Describa algunas analogías con el fenómeno de fragilidad en caliente.

1.57 Consiga cierta cantidad de bolas pequeñas de plástico, madera, mármol o metal y dispóngalas con sus manos o péguelas para representar las estructuras cristalinas que se muestran en las figuras 1.3 a 1.5. Comente sobre sus observaciones.

1.58 Tome una baraja de naipes, coloque una banda elástica a su alrededor y después deslice las cartas una sobre otra para representar las figuras 1.6a y 1.7. Si repite el mismo experi-

mento con más y más bandas de hule alrededor de la misma baraja, ¿qué está logrando con referencia al comportamiento de la baraja?

1.59 Proporcione ejemplos en los que la anisotropía dependa de la escala. Por ejemplo, un cable de acero puede contener alambres recocidos que son isotrópicos a escala microscópica, pero el cable en su conjunto es anisotrópico.

1.60 En la sección 1.4 se describe el movimiento de una dislocación de borde por medio de una analogía que involucra una joroba en una alfombra puesta sobre el piso y cómo puede moverse toda la alfombra gradualmente al desplazar la joroba hacia adelante. Recuerde que el enmarañamiento de las dislocaciones se describe en términos de dos jorobas en diferentes ángulos. Use un trozo de tela sobre una mesa plana para demostrar estos fenómenos.

Comportamiento mecánico, pruebas y propiedades de manufactura de los materiales

CAPÍTULO

2

- En este capítulo se examinan los efectos de las fuerzas externas sobre el comportamiento de los materiales y los métodos de prueba empleados para determinar sus propiedades mecánicas.
- El ensayo de tensión, que se describe primero, se usa comúnmente para cuantificar varios parámetros de los materiales, incluyendo el módulo de elasticidad, el esfuerzo de cedencia, la resistencia máxima, la ductilidad y la tenacidad.
- Los ensayos de compresión, descritos posteriormente, son útiles porque simulan de manera más cercana algunos de los procesos metalúrgicos aun así, tienen el inconveniente inevitable de que la fricción contribuye en los resultados del ensayo.
- Los ensayos de flexión son particularmente útiles para los materiales frágiles; los ensayos que se usan con mayor frecuencia son los de tres y cuatro puntos.
- A continuación se describe la dureza y su variedad de ensayos, así como su rango de aplicabilidad.
- La fatiga implica la falla del material debido a cargas cíclicas o repetidas, mientras que la termofluencia es la deformación debida a la aplicación de una carga constante durante un periodo prolongado; estos conceptos también son analizados.
- El capítulo termina con una descripción de los tipos de falla y de los factores que intervienen en la falla y fractura de los materiales.

2.1	Introducción	55
2.2	Tensión	56
2.3	Compresión	65
2.4	Torsión	66
2.5	Doblado (flexión)	67
2.6	Dureza	67
2.7	Fatiga	73
2.8	Termofluencia	74
2.9	Impacto	74
2.10	Falla y fractura de los materiales	75
2.11	Esfuerzos residuales	80
2.12	Trabajo, calor y temperatura	81

EJEMPLOS:

2.1	Cálculo de la resistencia máxima a la tensión	62
2.2	Cálculo del módulo de resiliencia a partir de la dureza	71

2.1 Introducción

En las operaciones de manufactura, las partes y los componentes de los productos son generados en una amplia variedad de formas mediante la aplicación de fuerzas externas a la pieza de trabajo, utilizando por lo general diversas herramientas y dados. Algunos ejemplos comunes de este tipo de operaciones son el forjado de discos de turbina, la extrusión de diversos componentes para escaleras de aluminio, el trefilado de alambre para la fabricación de clavos y el laminado de metal para hacer hojas que se usarán en carrocerías de automóvil, electrodomésticos y equipos de oficina. Las operaciones de formado pueden llevarse a cabo a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas y con una rapidez de deformación baja o alta. Muchas de estas operaciones también se utilizan en el formado y el conformado de materiales no metálicos, tales como plásticos, cerámicos y materiales compósitos, como se describe a lo largo de este texto.

En la tabla I.2 se mostró que existe una amplia variedad de materiales metálicos y no metálicos disponibles con una gama igualmente extensa de propiedades y características, tal como se muestra de manera cualitativa en la tabla 2.1. Este capítulo trata sobre los aspectos de las propiedades mecánicas y el comportamiento de los metales que son relevantes para el diseño y la manufactura de productos e incluye métodos de prueba que se usan comúnmente en la evaluación de distintas propiedades.

TABLA 2.1

Propiedades mecánicas relativas de diversos materiales a temperatura ambiente (en orden decreciente). Los metales están en su forma de aleación

Resistencia	Dureza	Tenacidad	Rigidez	Resistencia/Densidad
Fibras de vidrio	Diamante	Metales dúctiles	Diamante	Plásticos reforzados
Fibras de carbono	Nitruro de boro cúbico	Plásticos reforzados	Carburos	Titanio
Fibras de Kevlar	Carburos	Termoplásticos	Tungsteno	Acero
Carburos	Aceros endurecidos	Madera	Acero	Aluminio
Molibdeno	Titanio	Termoestables	Cobre	Magnesio
Aceros	Hierros fundidos	Cerámicos	Titanio	Berilio
Tantalio	Cobre	Vidrio	Aluminio	Cobre
Titanio	Termofijos		Cerámicos	Tantalio
Cobre	Magnesio		Plásticos reforzados	
Termofijos reforzados	Termoplásticos		Madera	
Termoplásticos reforzados	Estaño		Termofijos	
Termoplásticos	Plomo		Termoplásticos	
Plomo			Hules	

2.2 Tensión

El **ensayo de tensión** es el método que se utiliza con más frecuencia para determinar las *propiedades mecánicas* de los materiales, como resistencia, tenacidad, ductilidad, módulo de elasticidad y capacidad de endurecimiento por deformación. La prueba requiere de preparar primero un **espécimen de prueba** (probeta), como se muestra en la figura 2.1a; aunque la mayoría de las probetas de tensión son sólidas y redondas, también pueden ser planas o tubulares. Por lo general, la probeta se prepara de acuerdo con las especificacio-

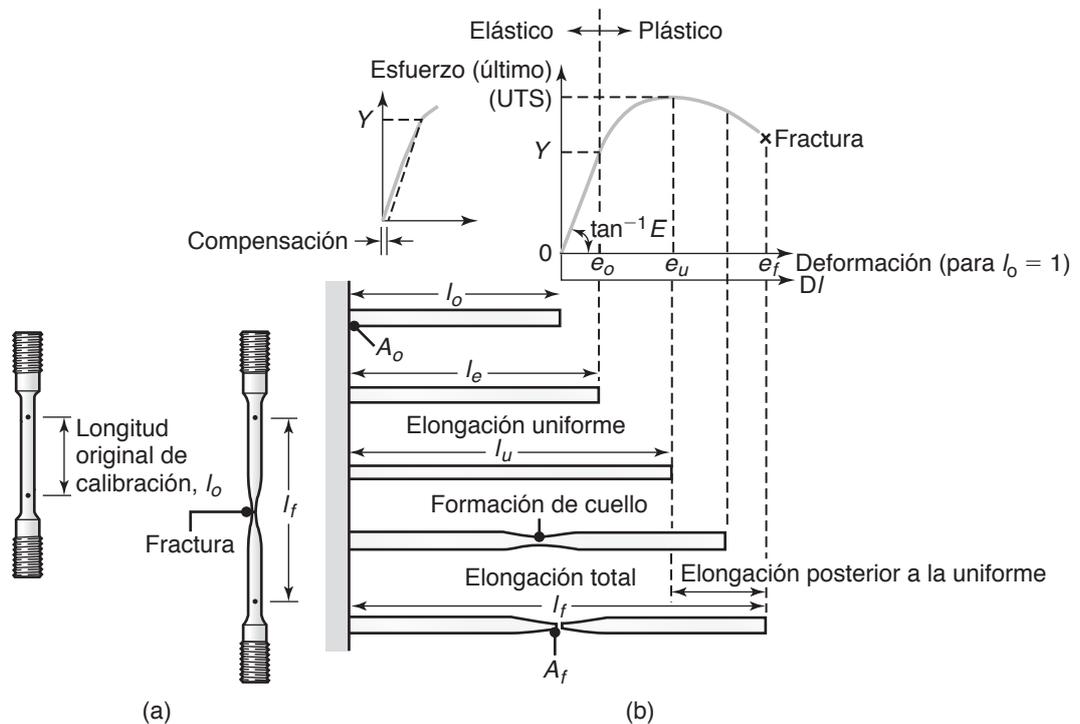


FIGURA 2.1 (a) Probeta estándar para ensayos de tensión, antes y después de ser estirada, que muestra las longitudes de calibración original y final. (b) Etapas del comportamiento de la probeta en un ensayo de tensión.

nes ASTM, aunque también existen otras diversas especificaciones de las organizaciones correspondientes en todo el mundo.

Por lo general, la probeta tiene una **longitud calibrada original**, l_o , de 50 mm (2 pulg) y un área de sección transversal, A_o , con diámetro de 12.5 mm (0.5 pulg). Se encuentra montada en las mordazas de una máquina para ensayos de tensión, la cual está equipada con diversos accesorios y controles para que la probeta pueda ser probada a diferentes temperaturas y velocidades de deformación.

2.2.1 Curvas de esfuerzo-deformación

En la figura 2.1b se muestra una secuencia típica en un ensayo de tensión. Cuando la carga se aplica por primera vez, la probeta se alarga en proporción a la carga, lo cual se conoce como **comportamiento elástico lineal** (figura 2.2). Si la carga se retira, la probeta vuelve a su longitud y forma originales, de manera similar a una banda de hule cuando se estira y después se suelta.

El **esfuerzo ingenieril**, también llamado **esfuerzo nominal**, se define como la relación de la carga aplicada, P , sobre el área de la sección transversal original, A_o , de la muestra:

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \quad (2.1)$$

La **deformación ingenieril** se define como

$$e = \frac{l - l_o}{l_o}, \quad (2.2)$$

donde l es la longitud instantánea de la probeta.

Conforme aumenta la carga, la probeta comienza a sufrir deformación elástica *no lineal*, a un esfuerzo llamado *límite proporcional*. En ese punto, el esfuerzo y la deformación ya no son proporcionales, como sí lo fueron en la región elástica lineal; pero cuando se retira la carga, la probeta aún regresa a su forma original. Cuando se alcanza el **esfuerzo de cedencia (o fluencia)**, Y , del material, se produce una **deformación permanente (plástica)**. En la tabla 2.2 se muestran el esfuerzo de cedencia y otras propiedades de diversos materiales metálicos y no metálicos.

Para los materiales blandos y dúctiles, quizá no sea fácil determinar la ubicación exacta del esfuerzo de cedencia o fluencia en la curva de esfuerzo-deformación, esto se

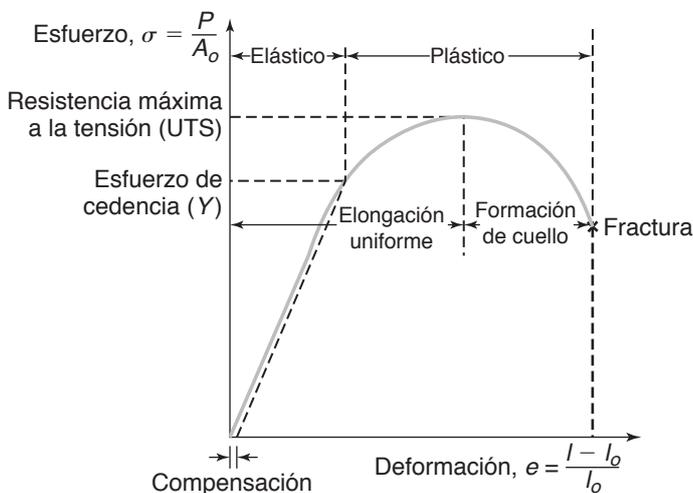


FIGURA 2.2 Curva de esfuerzo-deformación típica obtenida a partir de un ensayo de tensión mostrando varias características.

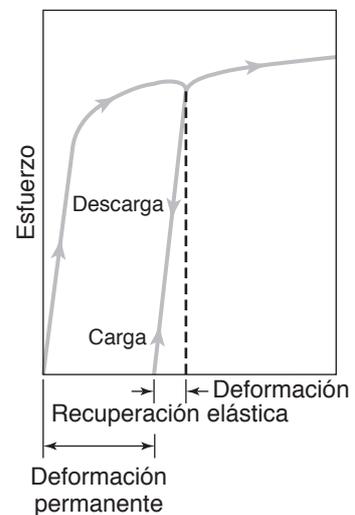


FIGURA 2.3 Ilustración esquemática de la carga y la descarga de una probeta para el ensayo de tensión. Observe que, durante la descarga, la curva sigue una trayectoria paralela a la pendiente elástica original.

TABLA 2.2

Propiedades mecánicas de diversos materiales a temperatura ambiente					
Material	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Módulo de Poisson, ν
Metales (forjados)					
Aluminio y sus aleaciones	69-79	35-550	90-600	45-4	0.31-0.34
Cobre y sus aleaciones	105-150	76-110	140-1310	65-3	0.33-0.35
Plomo y sus aleaciones	14	14	20-55	50-9	0.43
Magnesio y sus aleaciones	41-45	130-305	240-380	21-5	0.29-0.35
Molibdeno y sus aleaciones	330-360	80-2070	90-2340	40-30	0.32
Níquel y sus aleaciones	180-214	105-1200	345-1450	60-5	0.31
Aceros	190-210	205-1725	415-1750	65-2	0.28-0.33
Titanio y sus aleaciones	80-130	344-1380	415-1450	25-7	0.31-0.34
Tungsteno y sus aleaciones	350-400	550-690	620-760	0	0.27
Zinc y sus aleaciones	50	25-180	240-550	65-5	0.27
Materiales no metálicos					
Cerámicos	70-1000	—	140-2600	0	0.2
Diamante	820-1050	—	60 000	—	0.2
Vidrio y porcelana	70-80	—	140	0	0.24
Carburo de silicio (SiC)	200-500	—	310-400	—	0.19
Nitruro de silicio (Si ₃ N ₄)	280-310	—	160-580	—	0.26
Hules	0.01-0.1	—	—	—	0.5
Termoplásticos	1.4-3.4	—	7-80	1000-5	0.32-0.40
Termoplásticos reforzados	2-50	—	20-120	10-1	0-0.5
Termofijos	3.5-17	—	35-170	0	0.34-0.5
Fibras de boro	380	—	3500	0	0.27
Fibras de carbono	275-415	—	2000-3000	0	0.21-0.28
Fibras de vidrio	73-85	—	3500-4600	0	0.22-0.26
Fibras de Kevlar	62-117	—	2800	0	0.36
Fibras de Spectra	73-100	—	2400-2800	3	0.46

Nota: En la parte superior de la tabla, los valores más bajos de E , Y y UTS y los valores más altos de elongación son para los metales puros. Multiplique los gigapascales (GPa) por 145 000 para obtener libras por pulgada cuadrada (psi) y los megapascales (MPa) por 145 para obtener psi.

debe a que la pendiente de la curva comienza a decrecer lentamente por encima del límite proporcional. Para este tipo de materiales, Y suele definirse dibujando una línea con la misma pendiente que la curva elástica lineal, pero con una **compensación** correspondiente a una deformación de 0.002, o 0.2% de la elongación. Así, el esfuerzo de cedencia (o fluencia) se define como el esfuerzo en el que esta línea de compensación interseca la curva de esfuerzo-deformación; este sencillo procedimiento se muestra en el lado izquierdo de la figura 2.2.

A medida que la probeta comienza a elongarse bajo una carga continuamente creciente, el área de su sección transversal disminuye en forma **permanente** y **uniforme** dentro de su longitud calibrada. Si se retira la carga de la probeta (a partir de un nivel de esfuerzo superior al esfuerzo de cedencia), la curva sigue una línea recta hacia abajo y paralela a la pendiente inicial de la curva, como se muestra en la figura 2.3. Conforme la carga se incrementa aún más, el esfuerzo ingenieril alcanzará un máximo en algún momento y después empezará a disminuir (figura 2.2). El esfuerzo ingenieril máximo se denomina **resistencia a la tensión o resistencia máxima a la tensión** (UTS, por sus siglas en inglés) del material. En la tabla 2.2 se proporcionan los valores de UTS para diversos materiales.

Si la probeta se carga más allá de su resistencia a la tensión, empieza la **formación de un cuello**, o comienza a *estrangularse*; el área de la sección transversal de la probeta ya no es uniforme a lo largo de la longitud calibrada y es más pequeña en la zona del cuello. A medida que avanza el ensayo, el esfuerzo ingenieril disminuye aún más y finalmente la probeta se fractura en la zona del cuello (figura 2.1a); el esfuerzo ingenieril presente al momento de la fractura se conoce como **esfuerzo de fractura** o **ruptura**.

La relación del esfuerzo sobre la deformación en la región elástica es el **módulo de elasticidad**, E , o **módulo de Young** (en honor al científico británico T. Young, 1773-1829):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}. \quad (2.3)$$

Esta relación lineal se conoce como **ley de Hooke** (en honor al físico británico R. Hooke, 1635-1703).

Observe en la ecuación (2.3) que, debido a que la deformación ingenieril es adimensional, E tiene las mismas unidades que el esfuerzo. El módulo de elasticidad es la pendiente de la porción elástica de la curva y , por lo tanto, indica la **rigidez** del material. Cuanto mayor sea el módulo de elasticidad, mayor será la carga requerida para estirar la probeta en la misma extensión y , por consiguiente, más rígido será el material. Compare, por ejemplo, la rigidez de un alambre de metal con la de una banda de goma o de plástico al estirarlos.

La elongación de la probeta bajo tensión está acompañada de contracción lateral; este efecto puede observarse fácilmente al estirar una banda de goma. El valor absoluto de la relación de la deformación lateral sobre la deformación longitudinal se conoce como **relación de Poisson** (o **módulo de Poisson**) (en honor al matemático francés S. D. Poisson, 1781-1840) y se denota por medio del símbolo ν .

2.2.2 Ductilidad

Un comportamiento importante que se observa durante un ensayo de tensión es la **ductilidad**; es decir, la extensión de la deformación plástica que experimenta el material antes de la fractura. Existen dos medidas comunes de la ductilidad. La primera es la **elongación total** de la muestra y está dada por

$$\text{Elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100, \quad (2.4)$$

donde l_f y l_o se miden como se muestra en la figura 2.1a. Observe que la elongación está basada en la longitud de la probeta calibrada originalmente y que se calcula como un porcentaje.

La segunda medida de la ductilidad es la **reducción del área**, está dada por

$$\text{Reducción del área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100, \quad (2.5)$$

donde A_o y A_f son, respectivamente, las áreas de la sección transversal original y final (fractura) de la probeta. Por lo tanto, la ductilidad de una pieza de tiza o gis es cero puesto que no se estira en absoluto ni su sección transversal se reduce; en contraste, una muestra dúctil, como un metal puro o un termoplástico, se estira y forma un cuello de manera considerable antes de la falla.

2.2.3 Esfuerzo real y deformación real

Recuerde que el esfuerzo ingenieril se basa en el área de la sección transversal original, A_o , de la probeta. Sin embargo, el área de la sección transversal instantánea de la probeta se reduce a medida que ésta se alarga, igual que lo hace el área de una banda de goma; por lo tanto, el esfuerzo ingenieril no representa el esfuerzo *verdadero* (o real) al que está sometida la probeta.

El **esfuerzo real** se define como la relación de la carga, P , sobre el área de la sección transversal verdadera (instantánea y, por lo tanto, *real*), A , de la probeta:

$$\sigma = \frac{P}{A}. \quad (2.6)$$

Para determinar la **deformación real**, primero se considera la elongación de la probeta consistente en incrementos de cambio instantáneo en la longitud. Luego, mediante cálculo, puede demostrarse que la deformación real (*deformación natural* o *logarítmica*) se determina como

$$\epsilon = \ln\left(\frac{l}{l_o}\right). \quad (2.7)$$

En las ecuaciones (2.2) y (2.7) observe que, para valores pequeños de deformación, las deformaciones ingenieril y real son aproximadamente iguales; sin embargo, divergen rápidamente a medida que aumenta la deformación. Por ejemplo, cuando $e = 0.1$, $\epsilon = 0.095$, y cuando $e = 1$, $\epsilon = 0.69$.

A diferencia de lo que ocurre con las deformaciones ingenieriles, en la deformación de los materiales las deformaciones reales son consistentes con los fenómenos físicos reales. Por ejemplo, considere una situación hipotética en la que se comprime una muestra de 50 mm (2 pulg) de altura, entre placas planas, hasta una altura final de cero; en otras palabras, la muestra se deforma infinitamente. De acuerdo con sus definiciones, la deformación ingenieril que experimenta la muestra es $(0 - 50)/50 = -1$, pero la deformación real es $-\infty$; observe que la respuesta será la misma independientemente de la altura original de la muestra. Es evidente, entonces, que la deformación real describe la extensión de la deformación de manera correcta puesto que la deformación es efectivamente infinita.

2.2.4 Construcción de curvas esfuerzo-deformación

El procedimiento para construir una curva de esfuerzo-deformación ingenieril consiste en tomar la curva de carga-elongación (figura 2.4a, y también figura 2.2) y entonces di-

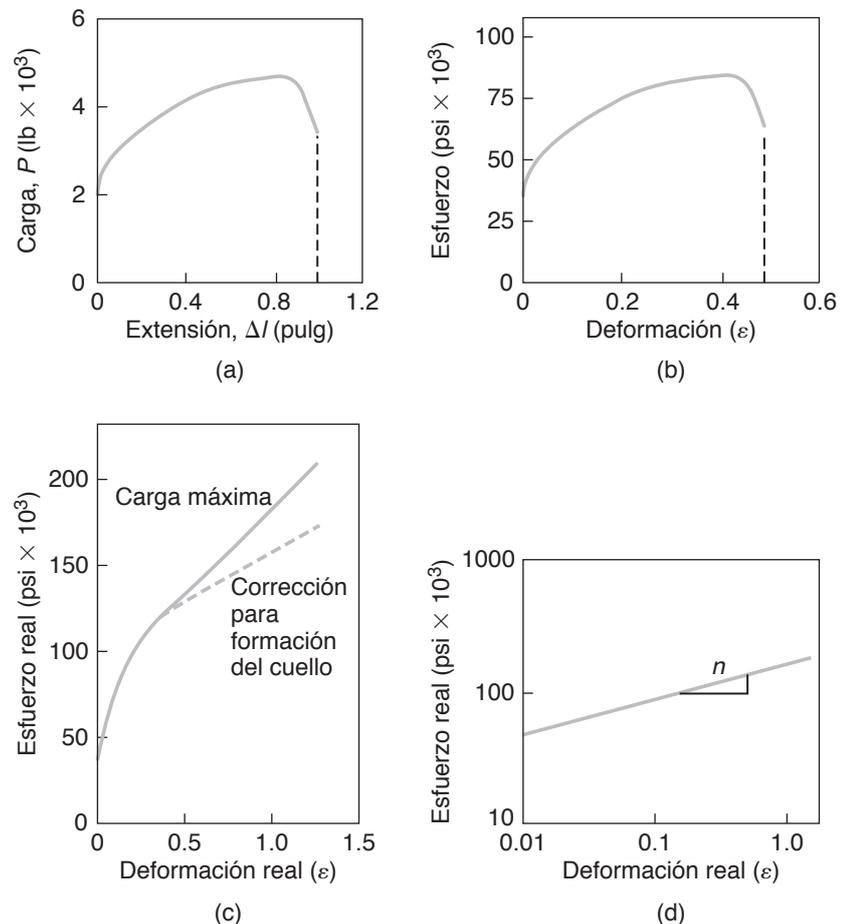


FIGURA 2.4 (a) Curva de carga-elongación en los ensayos de tensión de una probeta de acero inoxidable. (b) Curva de esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril elaborada a partir de los datos de la figura 2.4a. (c) Curva de esfuerzo real-deformación real elaborada a partir de los datos de la figura 2.4b. Observe que esta curva tiene una pendiente positiva, lo cual indica que el material se está volviendo más resistente a medida que se deforma. (d) Curva de esfuerzo real-deformación real trazada sobre papel logarítmico y basada en la curva corregida de la figura 2.4c. La corrección se debe al estado triaxial de esfuerzo que existe en la región del cuello de la probeta.

vidir la carga (eje vertical) entre el área de la sección transversal original, A_o , y la elongación (eje horizontal) entre la longitud calibrada original, l_o . Debido a que A_o y l_o son constantes, la curva de esfuerzo-deformación ingenieril obtenida (que se muestra en la figura 2.4b) tiene la misma forma que la curva de carga-elongación mostrada en la figura 2.4a. (En este ejemplo, $A_o = 0.056 \text{ pulg}^2$ y $A_f = 0.016 \text{ pulg}^2$).

Las curvas de esfuerzo real-deformación real se obtienen de manera similar al dividir la carga entre el área de la sección transversal instantánea, con la deformación real calculada a partir de la ecuación (2.7); el resultado se muestra en la figura 2.4c. Observe la *corrección* de la curva, lo cual refleja el hecho de que la zona del cuello de la probeta se somete a esfuerzos de tensión en tres dimensiones, como se describe en textos más avanzados. Este estado de esfuerzo da valores de esfuerzo más altos que el verdadero esfuerzo real; por consiguiente, para compensar, la curva debe corregirse hacia abajo.

La curva de esfuerzo real-deformación real de la figura 2.4c puede representarse mediante la ecuación

$$\sigma = K\epsilon^n, \quad (2.8)$$

donde K es el **coeficiente de resistencia** y n es el **exponente de endurecimiento por deformación o endurecimiento por trabajo**. En la tabla 2.3 se proporcionan los valores típicos de K y n para varios metales.

Cuando la curva mostrada en la figura 2.4c es una gráfica log-log, se encuentra que la curva es aproximadamente una línea recta (figura 2.4d); la pendiente de la curva es el exponente n . Por lo tanto, cuanto mayor sea la pendiente, mayor será la capacidad de endurecimiento por deformación del material; es decir, se volverá más resistente y más duro a medida que se deforme. En la figura 2.5 se muestran las curvas de esfuerzo real-deformación real para varios metales. Mediante un análisis detallado, pueden observarse algunas diferencias entre la tabla 2.3 y la figura 2.5. Estas discrepancias surgen porque se han utilizado diferentes fuentes de datos y distintas muestras para obtener esos valores.

Observe que se han eliminado las regiones elásticas en las curvas debido a que ahí la pendiente es muy alta. Por consiguiente, el punto de intersección de cada curva con el eje vertical en esta figura puede considerarse como el esfuerzo de cedencia o fluencia, Y , del material.

En una deformación particular, el área bajo la curva de esfuerzo real-deformación real es la energía por unidad de volumen (**energía específica**) del material deformado e indica el trabajo que se requiere para deformar plásticamente una unidad de volumen del material hasta esa deformación. El área bajo la curva de esfuerzo real-deformación real hasta la fractura se conoce como **tenacidad** del material; es decir, la cantidad de energía por unidad de volumen que disipa el material antes de la fractura. Note que la tenacidad implica tanto la altura como la anchura de la curva de esfuerzo-deformación del material, mientras que la resistencia se relaciona únicamente con la *altura* de la curva y la ductilidad está relacionada sólo con su *anchura*.

2.2.5 Deformación en el cuello en una prueba de tensión

Como se dijo anteriormente, el inicio de la formación de un cuello en una probeta durante un ensayo de tensión corresponde a la resistencia máxima a la tensión del material. Observe que la pendiente de la curva de carga-elongación en este punto es cero, y es allí donde la probeta empieza a formar un cuello. La probeta no puede soportar la carga que se le aplica debido a que el área de la sección transversal del cuello se vuelve más pequeña a una rapidez mayor que la rapidez a la que el material se vuelve más resistente (endurecimiento por deformación).

La deformación real al inicio de la formación del cuello es numéricamente igual al exponente, n , del endurecimiento por deformación del material. Por lo tanto, cuanto mayor sea el

TABLA 2.3

Valores típicos de K y n para los metales seleccionados

Material	K (MPa)	n
Aluminio		
1100-O	180	0.20
2024-T4	690	0.16
5052-O	202	0.13
6061-O	205	0.20
6061-T6	410	0.05
7075-O	400	0.17
Latón		
70-30, recocido	900	0.49
85-15, laminado en frío	580	0.34
Aleación a base de cobalto, con tratamiento térmico	2070	0.50
Cobre, recocido	315	0.54
Acero		
Bajo-C, recocido	530	0.26
1020, recocido	745	0.20
4135, recocido	1015	0.17
4135, laminado en frío	1100	0.14
4340, recocido	640	0.15
304 inoxidable, recocido	1275	0.45
410 inoxidable, recocido	960	0.10
Titanio		
Ti-6Al-4V, recocido, 20 °C	1400	0.015
Ti-6Al-4V, recocido, 200 °C	1040	0.026
Ti-6Al-4V, recocido, 600 °C	650	0.064
Ti-6Al-4V, recocido, 800 °C	350	0.146

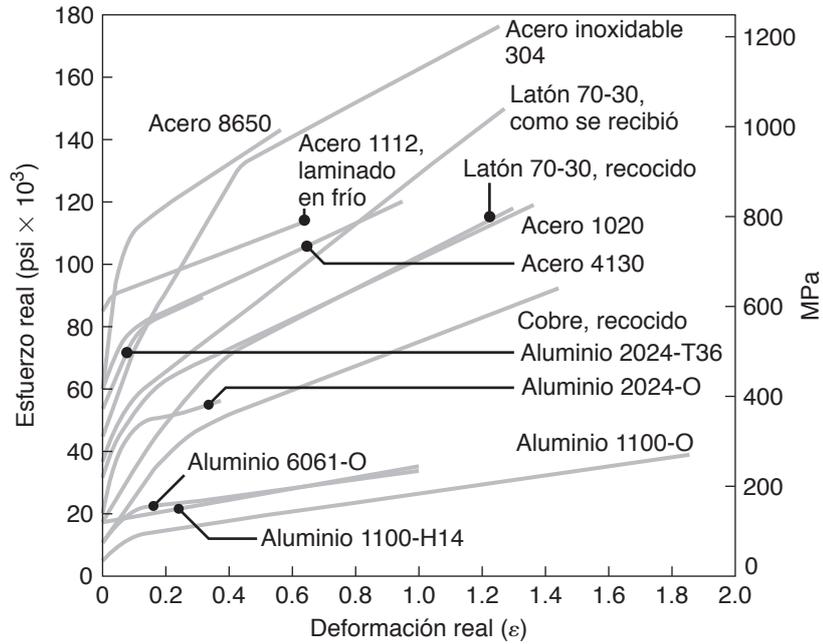


FIGURA 2.5 Curvas de esfuerzo real-deformación real en tensión, a temperatura ambiente, para varios metales; las curvas empiezan en un nivel finito de esfuerzo. Las regiones elásticas tienen una pendiente demasiado inclinada para poder mostrarse en esta figura; por lo tanto, cada curva comienza en el esfuerzo de cedencia, Y , del material.

valor de n , mayor será la deformación que una pieza de material puede experimentar antes de que comience a formarse el cuello. Esta observación es importante, particularmente en lo relativo a las operaciones de formado de hojas metálicas que implican el estiramiento de la pieza de material (capítulo 16). En la tabla 2.3 se puede observar que el cobre recocido, el latón y el acero inoxidable tienen valores altos de n , esto significa que pueden estirarse de manera uniforme a un mayor grado de lo que pueden hacerlo los otros metales descritos en la tabla.

EJEMPLO 2.1 Cálculo de la resistencia máxima a la tensión

Dado: Este ejemplo muestra que la UTS de un material se puede calcular a partir de su coeficiente de resistencia, K , y de su exponente de endurecimiento por deformación, n . Supongamos que un material tiene una curva de esfuerzo real-deformación real dada por

$$\sigma = 100\,000 \epsilon^{0.5} \text{ psi.}$$

Se solicita: Calcular la resistencia máxima a la tensión real y la UTS ingenieril de este material.

Respuesta: Recuerde que la deformación en la formación del cuello corresponde al exponente de endurecimiento por deformación; la deformación en la formación del cuello para este material es

$$\epsilon = n = 0.5,$$

por lo tanto, la resistencia máxima a la tensión real es

$$\sigma = Kn^n = 100\,000(0.5)^{0.5} = 70\,710 \text{ psi.}$$

El área real al inicio de la formación del cuello se obtiene a partir de

$$\ln\left(\frac{A_o}{A_{\text{cuello}}}\right) = n = 0.5.$$

Por lo tanto,

$$A_{\text{cuello}} = A_o e^{-0.5},$$

y la carga máxima, P , es

$$P = \sigma A_{\text{cuello}} = \sigma A_o e^{-0.5},$$

donde σ es la UTS real. Por lo tanto,

$$P = (70\,710)(0.606)(A_o) = 42\,850A_o \text{ lb.}$$

Como $UTS = P/A_o$,

$$UTS = 42\,850 \text{ lb.}$$

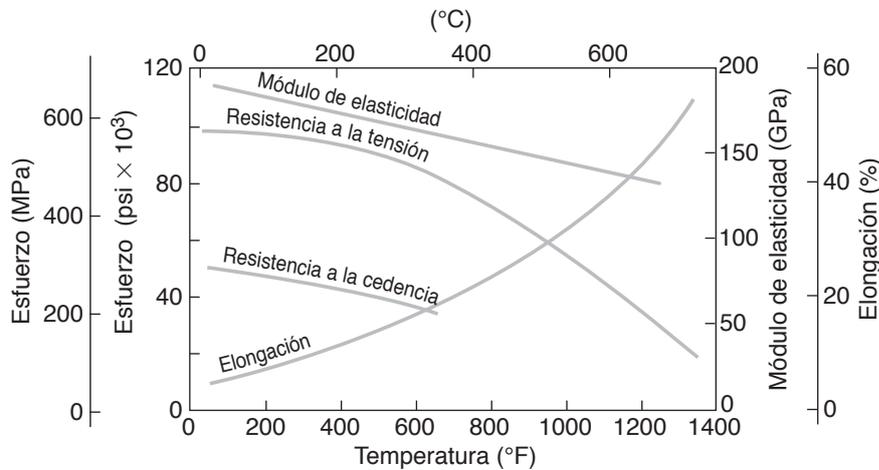


FIGURA 2.6 Efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de un acero al carbono; la mayoría de los materiales muestran sensibilidades a la temperatura similares para el módulo de elasticidad, la resistencia a la cedencia, la resistencia máxima a la tensión y la ductilidad.

2.2.6 Efectos de la temperatura

Por lo general, el aumento de la temperatura tiene los siguientes efectos en las curvas esfuerzo-deformación (figura 2.6):

- La ductilidad y la tenacidad aumentan.
- La resistencia a la cedencia y el módulo de elasticidad disminuyen.

La temperatura también afecta al exponente de endurecimiento por deformación, n , de la mayoría de los metales, el cual se incrementa con el aumento de la temperatura. Sin embargo, la influencia de la temperatura se describe de mejor manera en relación con la rapidez de deformación porque el aumento de la velocidad de deformación tiende a disminuir a n , como se describe a continuación.

2.2.7 Efectos de la rapidez de deformación y de la velocidad de deformación

Al igual que un globo puede inflarse o una banda de goma puede estirarse a diferentes velocidades, una pieza de material en un proceso de manufactura puede moldearse a diferentes velocidades. Algunas máquinas, como las prensas hidráulicas, forman los materiales a bajas velocidades, mientras que otras, como las prensas mecánicas, dan forma a los materiales a velocidades altas.

La **rapidez de deformación** en un ensayo de tensión es la velocidad a la que se está estirando una probeta, en unidades como m/s o pies/min. La **velocidad de deformación**, por otra parte, es una función de la longitud de la muestra. Por ejemplo, considere dos bandas de goma, una de 20 mm y otra de 100 mm de longitud, respectivamente, que se estiran 10 mm en un periodo de 1 s. La deformación ingenieril en la probeta más corta es $\frac{10}{20} = 0.5$; la deformación en la probeta más larga es $\frac{10}{100} = 0.1$. Por lo tanto, las velocidades de deformación son 0.5 s^{-1} y 0.1 s^{-1} , respectivamente; así que la banda corta está siendo sometida a una velocidad de deformación cinco veces mayor que la de la banda larga, a pesar de que ambas están siendo estiradas a la misma rapidez de deformación.

En la tabla 2.4 se dan las velocidades de deformación que por lo general se emplean en diversas pruebas, así como los procesos de trabajo de los metales y las deformaciones reales involucradas. Debido al amplio rango encontrado en la práctica, las velocidades de deformación suelen expresarse en términos de órdenes de magnitud, como 10^2 s^{-1} , 10^4 s^{-1} , etcétera.

En la figura 2.7 se muestran los efectos típicos que tienen la temperatura y la velocidad de deformación en conjunto sobre la resistencia de los metales. Observe que al

TABLA 2.4

Rangos típicos de deformación y rapidez de deformación en los procesos de manufactura		
Proceso	Deformación real	Rapidez de deformación (m/s)
Trabajo en frío		
Forjado, laminado	0.1-0.5	0.1-100
Trefilado y formado de tubos	0.05-0.5	0.1-100
Formado explosivo	0.05-0.2	10-100
Trabajo en caliente y trabajo en tibio		
Forjado, laminado	0.1-0.5	0.1-30
Extrusión	2-5	0.1-1
Maquinado	1-10	0.1-100
Formado de hojas metálicas	0.1-0.5	0.05-2
Formado superplástico	0.2-3	10 ⁻⁴ -10 ⁻²

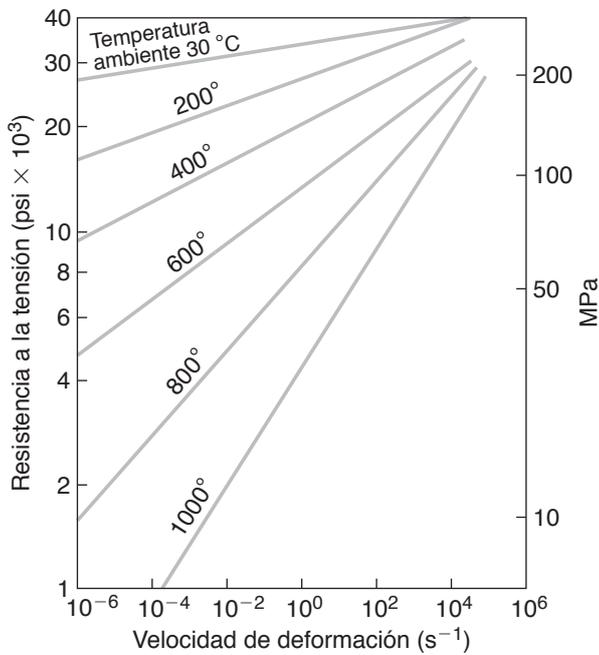


FIGURA 2.7 Efecto de la velocidad de deformación en la resistencia máxima a la tensión del aluminio. Observe que, al aumentar la temperatura, las pendientes de las curvas se incrementan; así que la resistencia se vuelve cada vez más sensible a la velocidad de deformación a medida que aumenta la temperatura. Fuente: J. H. Hollomon.

incrementar la velocidad de deformación aumenta la resistencia del material, llamada **endurecimiento por velocidad de deformación**. La pendiente de estas curvas se denomina **exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación, m**. El valor de *m* se obtiene a partir de gráficas log-log siempre que las escalas verticales y horizontales sean iguales (a diferencia de las mostradas en la figura 2.7). Por lo tanto, una pendiente de 45° indica un valor de *m* = 1. La relación está dada por la ecuación

$$\sigma = C\dot{\epsilon}^m, \tag{2.9}$$

donde *C* es el **coeficiente de resistencia** y $\dot{\epsilon}$ es la **velocidad de deformación real** definida como la deformación real que sufre el material por unidad de tiempo. Observe que *C* tiene unidades de esfuerzo y es similar a, pero no debe confundirse con, el coeficiente de resistencia *K* incluido en la ecuación (2.8).

A partir de la figura 2.7, se puede ver que la sensibilidad de la resistencia a la velocidad de deformación aumenta con la temperatura; en otras palabras, *m* aumenta con el aumento de la temperatura. También observe que la pendiente es relativamente plana a temperatura ambiente; es decir, *m* es muy baja. Esta condición es verdadera para la mayoría de los metales, pero no para aquellos que se recristalizan a temperatura ambiente, como el plomo y el estaño. Los rangos típicos de *m* para los metales son de hasta 0.05 para trabajo en frío, de 0.05 a 0.4 para trabajo en caliente, y de 0.3 a 0.85 para los materiales superplásticos (se analiza enseguida).

La magnitud del exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación influye significativamente en la formación del cuello en una prueba de tensión. Con el aumento de *m*, el material se estira más antes de fallar, por lo que el incremento de *m* retrasa la formación del cuello. La mejora en ductilidad causada por una alta sensibilidad a la velocidad de deformación en algunos materiales se ha explotado en el **formado superplástico** de hojas metálicas, tal como se describe en la sección 16.10.

Superplasticidad. El término *superplasticidad* se refiere a la capacidad de algunos materiales de someterse a una gran elongación uniforme antes de la formación de un cuello y de la fractura por tensión. La elongación oscila desde unos pocos cientos por ciento hasta 2000%. Los materiales no metálicos comunes que exhiben un comportamiento superplástico son la goma de mascar, el vidrio (a temperaturas elevadas) y los termoplásticos; en consecuencia, el vidrio y los termoplásticos pueden formarse con éxito en una amplia variedad de formas complejas. Entre los metales que presentan comportamiento

superplástico están las aleaciones de titanio y zinc-aluminio con grano muy fino (de 10 a 15 μm); al calentarlas, pueden elongarse hasta varias veces su longitud original.

2.2.8 Efectos de la presión hidrostática

Se han realizado varias pruebas para determinar el efecto de la presión hidrostática sobre las propiedades mecánicas de los materiales. Los resultados de las pruebas con presiones de hasta 3.5 GPa (500 ksi) indican que el aumento de la presión hidrostática incrementa sustancialmente la deformación a la fractura, tanto para materiales dúctiles como para materiales frágiles. Este efecto beneficioso de la presión hidrostática se ha explotado en los procesos de trabajo con metales, en particular en la extrusión hidrostática (sección 15.4.2) y en la compactación de polvos metálicos (sección 17.3).

2.2.9 Efectos de la radiación

En vista de la utilización de diferentes metales y aleaciones en aplicaciones nucleares, se han realizado extensos estudios sobre los efectos que tiene la radiación en las propiedades mecánicas. Los cambios típicos en las propiedades de los aceros y otros metales expuestos a dosis de alta radiación son aumentos en el esfuerzo de cedencia, la resistencia a la tensión y la dureza, así como disminuciones de la ductilidad y la tenacidad.

2.3 Compresión

Muchas operaciones de manufactura, como el forjado, el laminado y el extruido (parte III), se llevan a cabo sometiendo a la pieza de trabajo a fuerzas de compresión. El **ensayo de compresión**, en el que la probeta o muestra se somete a una carga de compresión, proporciona información útil para estimar los requisitos de fuerza y potencia necesarios en dichos procesos. Esta prueba suele realizarse mediante la compresión de una probeta cilíndrica sólida entre dos troqueles planos bien lubricados (platinas). Debido a la fricción entre la muestra y las platinas, la superficie cilíndrica de la muestra se abomba, lo cual se conoce como **abarrilamiento** (figura 2.8). Por lo general, la relación de la altura sobre el diámetro de la probeta es de menos de 3:1 con el fin de evitar el pandeo durante la prueba (vea también la sección 14.4 sobre *encabezado*).

Debido al abarrilamiento, el área de la sección transversal de la probeta varía a lo largo de su altura y, por lo tanto, puede ser difícil obtener las curvas de esfuerzo-deformación en compresión. Además, como la fricción disipa energía, la fuerza de compresión es mayor de lo que sería de otro modo a fin de superar la fricción. Sin embargo, con una lubricación efectiva, la fricción puede minimizarse y, por consiguiente, es posible mantener un área de sección transversal razonablemente constante durante la prueba.

Cuando se comparan los resultados de las pruebas de compresión y tensión realizadas en los metales *dúctiles*, se observa que las curvas de esfuerzo real-deformación real coinciden. Sin embargo, este comportamiento no es verdadero para los materiales *frágiles*, que suelen ser más resistentes y más dúctiles en compresión que en tensión (vea la tabla 8.2).

Si una muestra se somete primero a tensión y se deforma plásticamente y después de liberar la carga se aplica una carga de compresión, se encuentra que el esfuerzo de cedencia en compresión es más bajo que en tensión. Este comportamiento, conocido como **efecto Bauschinger** (en honor al ingeniero alemán J. Bauschinger quien lo reportó en 1881), es exhibido en diver-



FIGURA 2.8 Abarrilamiento debido a la compresión de una muestra cilíndrica sólida redonda (aluminio 7075-O) entre troqueles planos. El abarrilamiento se debe a la fricción que hay en las interfaces entre los dados y la muestra, lo que retarda el flujo libre del material (vea también la figura 14.3).

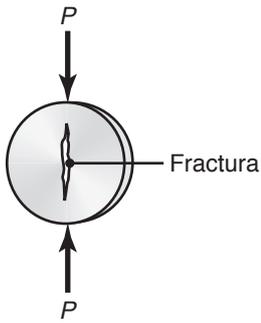


FIGURA 2.9 Prueba de disco en un material frágil mostrando la dirección de la carga y la trayectoria de la fractura.

Los grados por todos los metales y aleaciones. El fenómeno también se denomina **ablandamiento por deformación** o **ablandamiento por trabajo** debido a que el esfuerzo de cedencia se reduce en dirección opuesta a la de la aplicación original de la carga.

Prueba de disco. Para materiales frágiles como los cerámicos y vidrios (capítulo 8), puede utilizarse la **prueba de disco** en la que un disco se somete a fuerzas de compresión diametrales entre dos platinas planas endurecidas (figura 2.9). Al cargarse la probeta de la manera mostrada, se desarrollan esfuerzos de tensión perpendiculares a la línea central vertical a lo largo del disco; la fractura inicia y el disco se divide verticalmente por la mitad.

En el disco el *esfuerzo de tensión*, σ , es uniforme a lo largo de la línea central y puede calcularse a partir de la fórmula

$$\sigma = \frac{2P}{\pi dt}, \tag{2.10}$$

donde P es la carga a la fractura, d es el diámetro del disco y t es su espesor. Con el fin de evitar fallas prematuras en los puntos de contacto, se colocan tiras delgadas de metal blando entre el disco y las dos platinas; estas tiras también protegen a las platinas de sufrir daño durante la prueba. El fenómeno de la fractura en el centro de la muestra se ha utilizado en la fabricación de *tubos sin costura* (sección 13.5).

2.4 Torsión

Además de someterse a fuerzas de tensión y compresión, una pieza de trabajo también puede estar sujeta a deformaciones cortantes (figura 2.10), como en el perforado de agujeros en hojas metálicas (sección 16.2), el recalado (sección 14.4) y el maquinado (sección 21.2). El método que se utiliza generalmente para determinar las propiedades de los materiales por cortante es el **ensayo de torsión**. Esta prueba se realiza por lo general sobre una probeta tubular delgada con el fin de obtener un esfuerzo aproximadamente uniforme y una distribución de la deformación a lo largo de su sección transversal.

Por lo general, la muestra de prueba tiene una sección transversal reducida con el fin de limitar la deformación a una zona estrecha. El **esfuerzo cortante**, τ , puede calcularse a partir de la fórmula

$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 t}, \tag{2.11}$$

donde T es el momento torsor aplicado, r es el radio medio del tubo y t es el espesor del tubo en su sección más estrecha.

La **deformación por cortante**, γ , puede calcularse a partir de la fórmula

$$\gamma = \frac{r\phi}{l}, \tag{2.12}$$

donde l es la longitud de la sección de tubo y ϕ es el **ángulo de giro** en radianes.

La relación del esfuerzo cortante sobre la deformación por cortante en el rango elástico se conoce como el **módulo de corte**, o **módulo de rigidez**, G . El módulo de corte es una cantidad relacionada con el módulo de elasticidad, E , mediante la fórmula

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \tag{2.13}$$

Se ha encontrado que el **ángulo de giro**, ϕ , a la fractura, debido a la torsión de barras redondas sólidas a altas temperaturas, es útil para estimar la capacidad de forjado de los metales (sección 14.5). Entre mayor sea el número de giros antes de la falla, mejor será la capacidad de forjado.

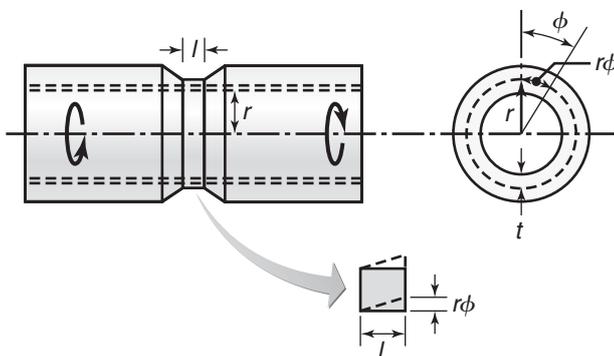


FIGURA 2.10 Probeta típica para un ensayo de torsión; ésta se monta entre los dos cabezales de la máquina de ensayo y se gira; observe la deformación cortante de un elemento en la sección reducida de la probeta.

2.5 Doblado (flexión)

La preparación de probetas de materiales frágiles puede ser un reto debido a las dificultades que implica su formado o maquinado con las dimensiones apropiadas. Además, las probetas son sensibles a defectos superficiales (como raspaduras y muescas) y la propia sujeción de probetas frágiles para realizar los ensayos es complicada. Por otro lado, la alineación incorrecta de la probeta puede dar lugar a una distribución no uniforme del esfuerzo a lo largo de su sección transversal.

Un método de prueba usado comúnmente para materiales frágiles es el **ensayo de flexión o doblado**, que por lo general implica una probeta con una sección transversal rectangular y se apoya del modo mostrado en la figura 2.11. La carga se aplica verticalmente, ya sea en uno o dos puntos y, en consecuencia, estos ensayos se conocen como **flexión en tres puntos** y **flexión en cuatro puntos**, respectivamente. Los esfuerzos longitudinales presentes en las probetas son de tensión en sus superficies inferiores y de compresión en sus superficies superiores; estos esfuerzos se pueden calcular utilizando las ecuaciones de una viga simple descritas en textos sobre mecánica de sólidos.

El esfuerzo a la fractura en flexión se conoce como el **módulo de ruptura**, o **resistencia a la ruptura transversal** (vea la tabla 8.2). Observe que, debido al mayor volumen de material sometido al mismo momento de flexión en la figura 2.11b, hay mayor probabilidad de que existan defectos dentro de este volumen que en el mostrado en la figura 2.11a. En consecuencia, el ensayo de cuatro puntos da un menor módulo de ruptura que la prueba de tres puntos.

2.6 Dureza

Por lo general, la **dureza** se define como la *resistencia a la indentación permanente*; por lo tanto, el acero es más duro que el aluminio y el aluminio es más duro que el plomo. Sin embargo, la dureza no es una propiedad fundamental debido a que la resistencia a la indentación depende de la forma del indentador y de la carga aplicada. La dureza es una propiedad de uso común; proporciona una indicación general de la resistencia del material y de su resistencia a las raspaduras y al desgaste.

2.6.1 Ensayos de dureza

Se han desarrollado varios métodos de prueba, utilizando diferentes materiales y formas de indentador (figura 2.12), para medir la dureza de los materiales. A continuación se describen los ensayos de dureza que se utilizan con más frecuencia.

Ensayo de dureza Brinell. Introducido por J. A. Brinell en 1900, este ensayo consiste en presionar una bola de acero o de carburo de tungsteno de 10 mm (0.4 pulg) de diámetro contra una superficie con una carga de 500, 1500 o 3000 kg (figura 2.13). El *número de dureza Brinell* (HB, por sus siglas en inglés) se define como la relación de la carga aplicada, P , sobre el área de la superficie curva de la indentación. Entre más duro sea el material probado, menor será la impresión; usualmente se recomienda una carga de 1500 o 3000 kg con el fin de obtener impresiones lo suficientemente grandes como para lograr una medición precisa de la dureza.

Dependiendo de la condición del material probado, después de la realización de una prueba de dureza se desarrolla uno de dos tipos de impresión sobre la superficie (figura 2.14). Por lo general, las impresiones en los metales recocidos tienen un perfil redondeado a lo largo de la periferia (figura 2.14a); en los metales trabajados en frío, suelen tener

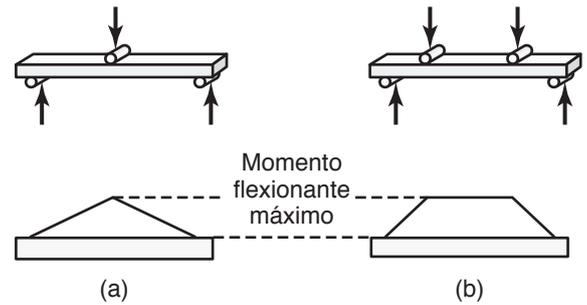


FIGURA 2.11 Dos métodos de prueba para la flexión de materiales frágiles: (a) flexión de tres puntos y (b) flexión de cuatro puntos. Las áreas que están sobre las vigas representan los diagramas de momento flexionante descritos en textos de mecánica de sólidos. Observe la región del momento flexionante máximo constante en (b); en contraste, el momento flexionante máximo se produce sólo en el centro de la muestra en (a).



Código QR 2.1 Ensayo de flexión de 3 puntos Instron 5544. (Fuente: Cortesía de Instron®).

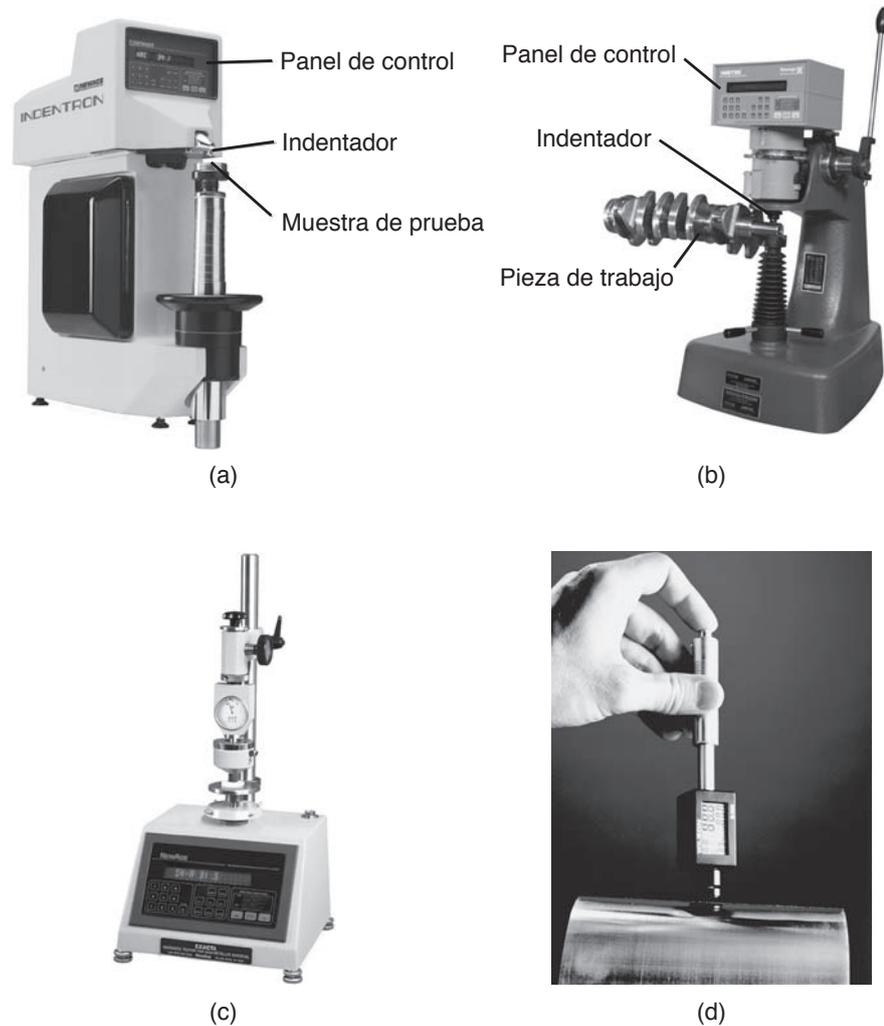


FIGURA 2.12 Selección de probadores de dureza. (a) Probador de dureza Micro Vickers, (b) probador de dureza Rockwell (se ha retirado el soporte de la pieza para mayor claridad), (c) durómetro y (d) probador Leeb. *Fuente:* (a) a (c), cortesía de Newage Testing Instruments, Inc., (d) cortesía de Wilson® Instruments.

un perfil agudo (figura 2.14b). En la misma figura se muestra el método correcto para medir el diámetro de la indentación, d .

El indentador tiene un módulo de elasticidad finito y, por lo tanto, sufre deformación *elástica* bajo la carga aplicada; como resultado, en función del material indentador, las mediciones de dureza pueden no ser tan precisas como se esperaría. Un método aplicado para reducir al mínimo este efecto consiste en utilizar bolas de carburo de tungsteno (sección 22.4); debido a su mayor módulo de elasticidad, se distorsionan menos que las bolas de acero. Por lo general, estos indentadores se recomiendan para materiales con un número de dureza Brinell superior a 500.



Código QR 2.2 Video de un ensayo de dureza Rockwell. (*Fuente:* Cortesía de Instron®).

Ensayo de dureza Rockwell. Desarrollado por S. P. Rockwell en 1922, este ensayo mide la *profundidad* de penetración en lugar del diámetro de la indentación. El indentador se presiona sobre la superficie, primero con una *carga menor* y luego con una *carga mayor*; la diferencia en las profundidades de penetración es una medida de la dureza del material. En la figura 2.13 se muestran algunas de las escalas más comunes de dureza Rockwell y los indentadores utilizados en la práctica. También se han desarrollado en-

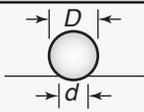
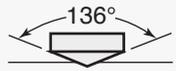
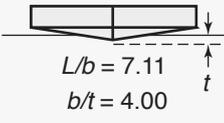
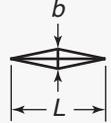
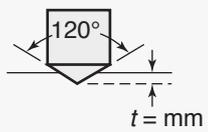
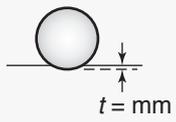
Prueba (Ensayo)	Indentador	Forma de la indentación		Carga, P	Número de dureza
		Vista lateral	Vista superior		
Brinell	Bola de acero o de carburo de tungsteno de 10 mm			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			1–120 kg	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$
Knoop	Pirámide de diamante			25 g–5 kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Cono de diamante			60 kg 150 kg 100 kg	HRA } HRC } HRD } = 100 – 500t
B } F } G }	Bola de acero con diámetro de $\frac{1}{16}$ pulg			100 kg 60 kg 150 kg	HRB } HRF } HRG } = 130 – 500t
E	Bola de acero con diámetro de $\frac{1}{8}$ pulg			100 kg	HRE }

FIGURA 2.13 Características generales de los métodos aplicados para probar la dureza y fórmulas para calcularla.

sayos de **dureza superficial** Rockwell utilizando el mismo tipo de indentadores pero con cargas más ligeras.

Ensayo de dureza Vickers. Esta prueba, desarrollada por la empresa Vickers Ltd. en 1922 y anteriormente conocida como ensayo de *dureza de pirámide de diamante*, utiliza un indentador de diamante en forma de pirámide (figura 2.13) y una carga que varía de 1 a 120 kg. El *número de dureza Vickers* se indica mediante HV, por sus siglas en inglés. Por lo general, las impresiones obtenidas son de menos de 0.5 mm (0.020 pulg) sobre la diagonal y las profundidades de penetración pueden ser tan bajas como 20 nm. En esencia, este ensayo proporciona el mismo número de dureza independientemente de la carga y es adecuado para pruebas de materiales con un amplio rango de dureza, incluyendo aceros tratados térmicamente. Asimismo, se han desarrollado procedimientos de prueba que utilizan microscopios de fuerza atómica y nanoindentadores.

Ensayo de dureza Knoop. Este ensayo, desarrollado por F. Knoop en 1939, utiliza un indentador de diamante en la forma de una pirámide alargada (figura 2.13); las cargas aplicadas oscilan generalmente desde 25 g hasta 5 kg. El *número de dureza Knoop* se indica mediante HK, por sus siglas en inglés. Debido a las cargas ligeras que se aplican, este ensayo es de **microdureza** y, por lo tanto, es adecuado para muestras muy pequeñas o muy delgadas y para materiales frágiles como carburos, cerámicos y vidrio.

El ensayo de dureza Knoop también se utiliza para medir la dureza de los granos individuales y los componentes en una aleación de metal. El tamaño de la indentación

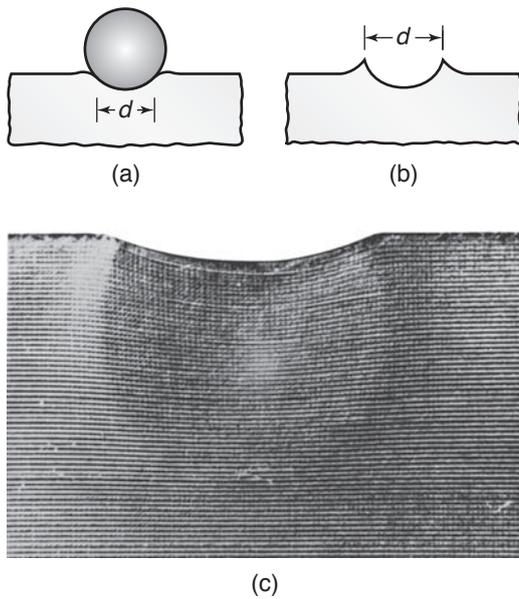


FIGURA 2.14 Geometría de indentación en el ensayo de dureza Brinell: (a) metal recocido, (b) metal endurecido por trabajo y (c) deformación de acero suave bajo un indentador esférico. Note que la profundidad de la zona deformada de manera permanente es de aproximadamente un orden de magnitud mayor que la profundidad de la indentación; para que una prueba de dureza sea válida, esta zona debe estar plenamente desarrollada en el material. Fuente: Según M. C. Shaw y C. T. Yang.

suele encontrarse en el intervalo de 0.01 a 0.10 mm (0.0004 a 0.004 pulg), por lo que la preparación de la superficie es importante. Debido a que el número de dureza obtenido depende de la carga aplicada, los resultados del ensayo Knoop siempre deben citar la carga empleada.

Ensayos de escleroscopio y Leeb. El *escleroscopio* (del griego *skleros*, que significa “duro”) es un instrumento en el que un indentador con punta de diamante (llamado *martillo*), encerrado en un tubo de vidrio, se deja caer sobre la muestra desde cierta altura. La dureza está relacionada con el *rebote* del indentador: cuanto mayor sea el rebote, más duro será el material probado. La impresión realizada por un escleroscopio es muy pequeña. Debido a que la obtención de resultados confiables a partir de un escleroscopio puede ser difícil, se ha desarrollado una versión electrónica llamada *Leeb* o prueba Equotip (figura 2.12d). En este ensayo, un martillo de carburo impacta la superficie y las velocidades incidental y de rebote se miden electrónicamente. Después se calcula un *número Leeb* y, por lo general, se convierte a dureza Rockwell o Vickers.

Dureza Mohs. Desarrollada en 1822 por F. Mohs, esta prueba se basa en la capacidad de un material de raspar a otro. La dureza Mohs se mide en una escala de 1 a 10, donde 1 es la medida del talco y 10 la del diamante (la sustancia más dura conocida; vea la sección 8.7). Así, un material con un número de dureza Mohs más alto siempre raspa a uno con un número más bajo. De manera típica, los materiales blandos tienen un número entre 2 y 3, los aceros endurecidos aproximadamente 6 y el óxido de aluminio (utilizado para herramientas de corte y como abrasivo en ruedas de esmeril) 9. Aunque la escala Mohs es cualitativa y la usan principalmente los mineralogistas, se correlaciona bien con el ensayo de dureza de Knoop.

Ensayo de dureza Shore y durómetro. La dureza de materiales como los cauchos, plásticos y materiales no metálicos blandos y elásticos similares suele medirse mediante un ensayo de dureza Shore, en el cual se utiliza un instrumento llamado *durómetro* (del latín *durus*, que significa “duro”). Primero se presiona un indentador contra la superficie y después se aplica rápidamente una carga constante. La *profundidad* de penetración se mide luego de un segundo; la dureza es inversamente proporcional a la penetración. Hay dos escalas diferentes para esta prueba. La escala tipo A tiene un indentador poco puntiagudo y una carga aplicada de 1 kg, la prueba se usa normalmente para materiales más blandos. La escala tipo D tiene un indentador más afilado y carga de 5 kg y se utiliza para materiales más duros. En el ensayo Shore los números de dureza varían de 0 a 100.

Dureza en caliente. La dureza de los materiales a temperaturas elevadas (vea la figura 22.1) es importante en aplicaciones como las herramientas de corte para el maquinado y los dados para el trabajo en caliente y las operaciones de fundición. Las pruebas de dureza pueden realizarse a temperaturas elevadas mediante probadores convencionales, con algunas modificaciones, tales como encerrar la muestra y el indentador en un pequeño horno eléctrico.

2.6.2 Dureza y resistencia

Debido a que la dureza es la resistencia a la indentación *permanente*, puede compararse con la realización de una prueba de compresión en un pequeño volumen sobre la superficie de un material (figura 2.14c). Los estudios han demostrado que la dureza de un metal

trabajado en frío es aproximadamente tres veces su esfuerzo de cedencia Y (en las mismas unidades); para los metales recocidos, la dureza es aproximadamente cinco veces Y .

Se ha establecido una relación entre la UTS y la dureza Brinell (HB) para los aceros, medida para una carga de 3000 kg. En unidades del SI, la relación está dada por

$$UTS = 3.5(HB), \quad (2.14)$$

donde UTS está en MPa. Si se usan las unidades tradicionales,

$$UTS = 500(HB), \quad (2.15)$$

donde UTS está en psi.

2.6.3 Procedimientos de los ensayos de dureza

Para que un ensayo de dureza sea significativo y confiable, es necesario permitir que la **zona de deformación** bajo el indentador (vea la figura 2.14c) se desarrolle libremente. En consecuencia, la *ubicación* del indentador (con respecto a la ubicación de los *bordes* de la muestra a probar) y el *espesor* de la muestra son consideraciones importantes. En general, la ubicación debe ser de al menos dos diámetros de la indentación desde el borde de la muestra y el espesor de ésta debe ser al menos 10 veces la profundidad de la penetración del indentador. También, las indentaciones sucesivas sobre una misma superficie de la pieza de trabajo deben estar lo suficientemente separadas como para que no interfieran entre sí.

Por otra parte, la indentación debe ser lo suficientemente grande como para proporcionar un valor representativo de la dureza en cuanto al volumen del material. Si se requiere detectar variaciones de dureza en un área pequeña, o se desea determinar la dureza de los componentes individuales de una matriz o aleación, las indentaciones deben ser muy pequeñas, como las obtenidas en los ensayos Vickers o Knoop, mediante la utilización de cargas ligeras. Aunque la *preparación de la superficie* no es crucial para el ensayo Brinell, sí es importante para el ensayo Rockwell y aún más importante para los otros ensayos de dureza debido a los pequeños tamaños de las indentaciones. Es posible que las superficies deban pulirse para permitir una medición correcta de las dimensiones de la impresión.

Los valores obtenidos en los diferentes ensayos de dureza, a diferentes escalas, pueden relacionarse y convertirse entre sí utilizando la figura 2.15. Debe tenerse cuidado en el uso de estos diagramas debido a las variables existentes en las características del material y en la forma de la indentación.

EJEMPLO 2.2 Cálculo del módulo de resiliencia a partir de la dureza

Dado: Una pieza de acero se deforma sumamente a temperatura ambiente; se encontró que su dureza es de 300 HB.

Se solicita: Estimar el área de la porción elástica de la curva de esfuerzo-deformación hasta el punto de cedencia (es decir, la *resiliencia*) para este material si la resistencia a la cedencia es un tercio de la dureza Brinell.

Respuesta: Dado que el acero ha sido sometido a grandes deformaciones a temperatura ambiente, puede suponerse que su curva de esfuerzo-deformación se ha aplanado considerablemente, por lo que se aproxima a la forma de una curva perfectamente plástica. Como la resistencia a la cedencia es un tercio de la dureza Brinell:

$$Y = \frac{300}{3} = 100 \text{ kg/mm}^2 = 142\,250 \text{ psi.}$$

El área bajo la curva de esfuerzo-deformación es

$$\text{Módulo de resiliencia} = \frac{Y^2}{2E}.$$

A partir de la tabla 2.2, $E = 210$ y $\text{GPa} = 30 \times 10^6$ psi para el acero. Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \text{Módulo de resiliencia} &= \frac{(142\,250)^2}{2(30 \times 10^6)} \\ &= 337 \text{ pulg-lb/pulg}^3. \end{aligned}$$

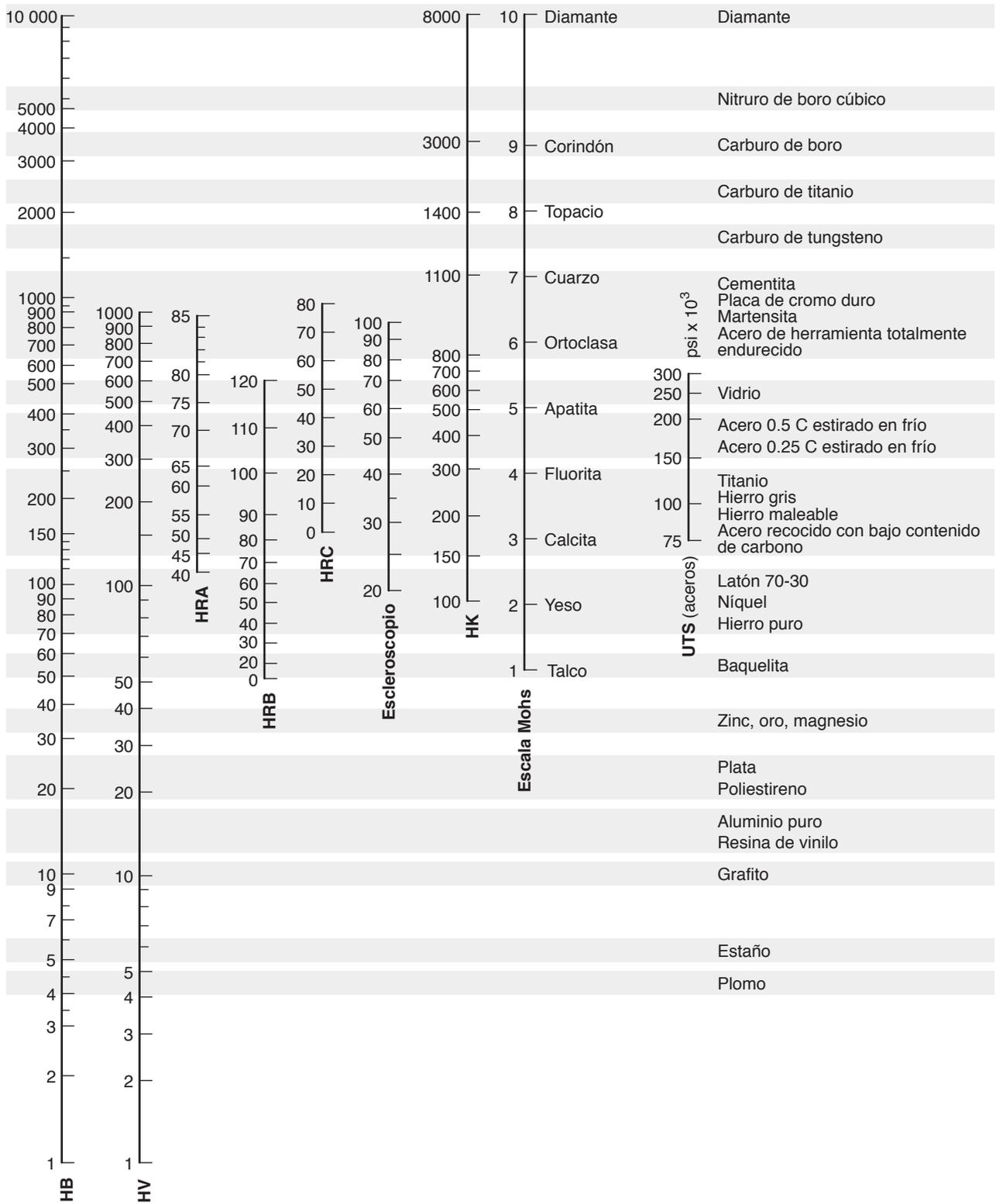


FIGURA 2.15 Diagrama para la conversión de varias escalas de dureza; observe el rango limitado de la mayoría de las escalas. Debido a los muchos factores involucrados, estos valores son aproximados.

2.7 Fatiga

Numerosos componentes, como herramientas, dados o matrices, engranes, levas, ejes y resortes, están sometidos a cargas que fluctúan rápidamente (en forma cíclica o periódica), además de las cargas estáticas. Los **esfuerzos cíclicos** pueden ser causados por cargas mecánicas fluctuantes, como (a) en los dientes de un engranaje o las correderas recíprocantes, (b) en la rotación de los elementos de una máquina bajo esfuerzos de flexión constantes, esto ocurre comúnmente en los ejes, o (c) en los esfuerzos térmicos, por ejemplo cuando un troquel a temperatura ambiente entra en contacto repetido con piezas de trabajo calientes y luego comienza a enfriarse entre los contactos sucesivos. Bajo estas condiciones, el componente falla a un nivel de esfuerzo *inferior* al nivel en el que se produciría la falla bajo carga estática. Tras una inspección, se encuentra que la falla está asociada con grietas que crecen en cada ciclo de esfuerzo y se propagan a través del material hasta que alcanzan una longitud crítica y se presenta la fractura del material. Este fenómeno, conocido como **falla por fatiga**, es responsable de la mayoría de las fallas en los componentes mecánicos.

Los *ensayos por fatiga* involucran probetas bajo diferentes estados de esfuerzo, por lo general en una combinación de tensión y flexión. El ensayo se lleva a cabo a diferentes *amplitudes de esfuerzo* (S) y entonces se registra el número de ciclos (N) que se requieren para causar la falla total de la probeta o de una parte de ésta. La amplitud del esfuerzo se define como el esfuerzo máximo, en tensión y en compresión, al que se somete la probeta. En la figura 2.16 se muestran dos gráficas típicas, llamadas **curvas S-N**. Estas curvas se basan en la inversión completa del esfuerzo —es decir, tensión máxima, después compresión máxima, luego tensión máxima, y así sucesivamente— como la que se impone al doblar una goma de borrar rectangular o un trozo de alambre alternativamente en una dirección y en otra.

Los ensayos también pueden realizarse sobre un eje giratorio mediante la flexión en cuatro puntos (vea la figura 2.11b). Con algunos materiales, la curva S-N se vuelve horizontal en los niveles bajos de esfuerzo, lo cual indica que el material no fallará con esfuerzos por debajo de estos límites. El esfuerzo máximo al que puede someterse el material sin falla por fatiga, independientemente del número de ciclos, se conoce como **límite de fatiga** o **límite de resistencia a la fatiga**.

Aunque muchos materiales, especialmente los aceros, tienen un límite de fatiga definido, otros, como las aleaciones de aluminio, no poseen ninguno y la curva S-N continúa su tendencia a la baja. Para los metales que tienen este tipo de comportamiento, la resistencia a la fatiga se especifica en cierto número de ciclos, por ejemplo 10^7 ; de esta manera puede especificarse la vida útil de servicio del componente. El límite de fatiga para los metales puede relacionarse de manera aproximada con su UTS (figura 2.17). Para los

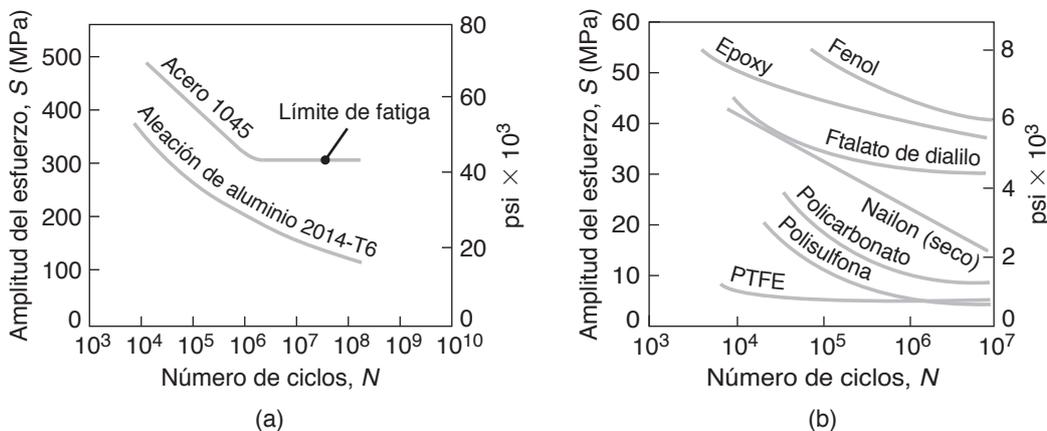


FIGURA 2.16 (a) Curvas S-N típicas para dos metales; observe que, a diferencia del acero, el aluminio no tiene un límite de fatiga. (b) Curvas S-N para algunos polímeros.

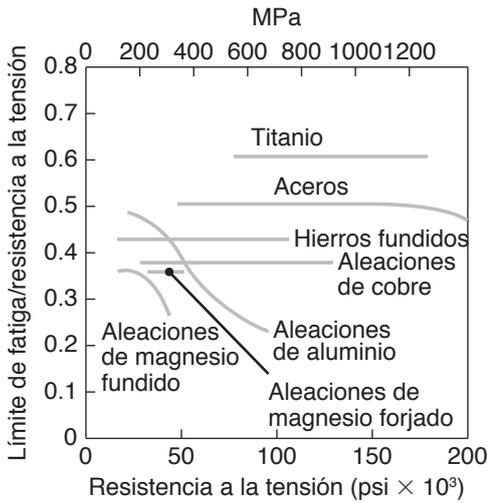


FIGURA 2.17 Relación del límite de fatiga sobre la resistencia a la tensión, para diversos metales, como una función de la resistencia a la tensión. Debido a que el aluminio no tiene un límite de fatiga, las correlaciones para el aluminio se basan en un número específico de ciclos, como se ve en la figura 2.16.

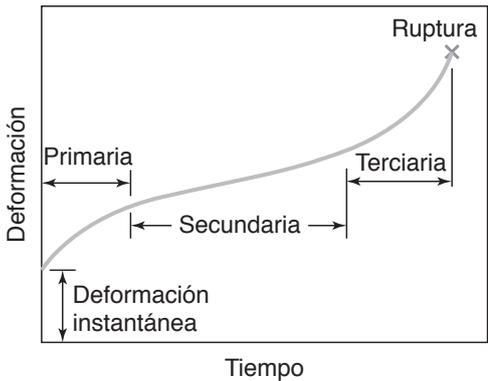


FIGURA 2.18 Ilustración esquemática de una curva típica de termofluencia; el segmento lineal de la curva (secundaria) se usa en el diseño de componentes para una vida específica en termofluencia.

aceros al carbono, el límite de fatiga suele estar entre 0.4 y 0.5 veces la resistencia a la tensión.

2.8 Termofluencia

La termofluencia es la deformación permanente de un componente sometido a una carga estática mantenida durante un periodo determinado. Este fenómeno se produce en los metales y en algunos materiales no metálicos, como los termoplásticos y los hules, y puede ocurrir a cualquier temperatura; la termofluencia en el plomo, por ejemplo, actúa bajo una carga de tensión constante a temperatura ambiente. Sin embargo, para los metales y sus aleaciones, la termofluencia adquiere importancia a temperaturas elevadas, comenzando aproximadamente a 200 °C (400 °F) para las aleaciones de aluminio y alrededor de los 1500 °C (2800 °F) para las aleaciones refractarias. En los metales, el mecanismo de termofluencia a temperaturas elevadas se atribuye generalmente al **deslizamiento de los límites de grano** (sección 1.5).

La termofluencia es importante especialmente en aplicaciones a altas temperaturas, como en las aspas de turbinas a gas, en los componentes de los motores a reacción y en los motores para cohetes. Las líneas de vapor a alta presión, los elementos del combustible nuclear y los componentes de hornos están igualmente sujetos a la termofluencia. La termofluencia también puede presentarse en herramientas y troqueles que se sujetan a grandes esfuerzos a temperaturas elevadas durante operaciones de trabajo en caliente, como el forjado y la extrusión.

Por lo general, el *ensayo de termofluencia* consiste en someter una muestra a tensión a carga constante (por lo tanto, a un esfuerzo ingenieril constante) a temperatura elevada y midiendo los cambios en la longitud durante varios incrementos de tiempo. Una curva de termofluencia consiste típicamente en las etapas *primaria*, *secundaria* y *terciaria* (figura 2.18). Durante la prueba, la muestra falla en algún momento mediante la formación de un cuello y la fractura, llamada *ruptura* o *ruptura por termofluencia*. Como era de esperarse, la velocidad de termofluencia aumenta con la temperatura de la muestra y la carga aplicada.

El *diseño contra la termofluencia* requiere usualmente del conocimiento del rango secundario (lineal) y de su pendiente, debido a que la velocidad de la termofluencia sólo puede determinarse de manera confiable cuando la curva tiene una pendiente constante. En general, la resistencia al fenómeno de termofluencia aumenta con la temperatura de fusión de un material. Por lo tanto, es común que se usen aceros inoxidables, superaleaciones y metales refractarios y sus aleaciones en aplicaciones donde se requiere resistencia a la termofluencia.

Relajación del esfuerzo. La *relajación del esfuerzo* está estrechamente relacionada con la termofluencia. En la relajación del esfuerzo, los esfuerzos resultantes de la carga externa de un componente estructural disminuyen en magnitud durante un periodo determinado, incluso cuando las dimensiones del componente se mantienen constantes. Un ejemplo es la disminución del esfuerzo tensil de un cable tenso entre dos extremos fijos (como las cuerdas de un piano o violín). Otros ejemplos incluyen la relajación del esfuerzo en los remaches, pernos, cables de retención y en diferentes partes similares, ya sea bajo tensión, compresión o flexión. La relajación del esfuerzo es particularmente frecuente e importante en los materiales termoplásticos (sección 7.3).

2.9 Impacto

En numerosos componentes de maquinaria y operaciones de manufactura, los materiales están sujetos a **cargas de impacto**, o **cargas dinámicas**; por ejemplo, en los procesos de

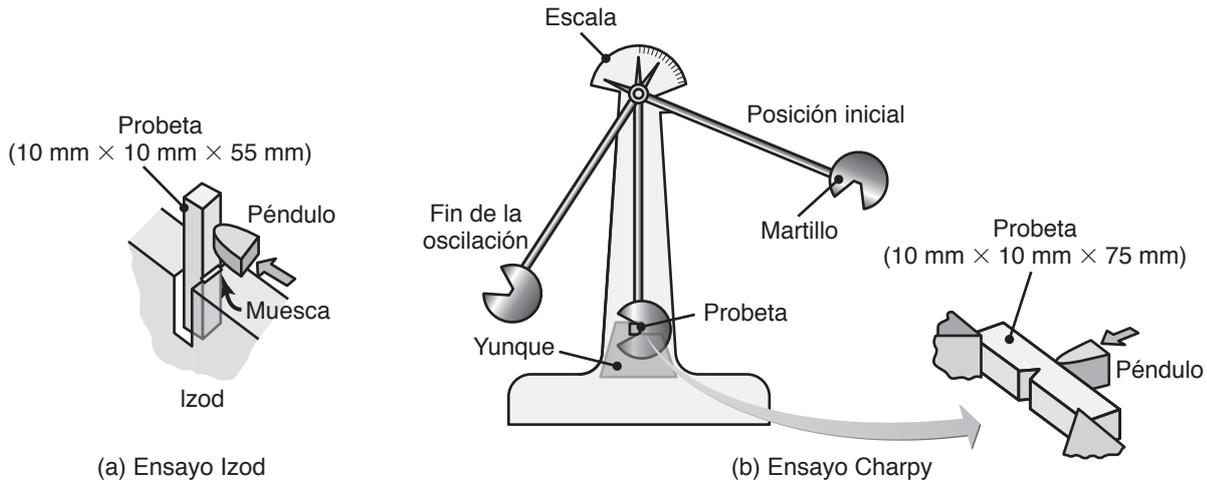


FIGURA 2.19 Probetas para ensayos de impacto.

formado de metales a alta velocidad, como las operaciones para dar forma a las cabezas de los clavos y pernos (sección 14.4). Un típico *ensayo de impacto* realizado para determinar las propiedades de impacto de los materiales consiste en colocar una probeta *muescada* en una máquina de impacto y romper la probeta con un péndulo oscilante (figura 2.19).

En el **ensayo Charpy** (en honor al científico francés G. Charpy), la probeta es apoyada en ambos extremos, mientras que en el **ensayo Izod** (en honor al ingeniero inglés E. G. Izod), la probeta se sostiene de un extremo como una viga en voladizo. A partir de la oscilación del péndulo, puede obtenerse la energía disipada en la ruptura de la probeta; esta energía es la **tenacidad al impacto** del material. A diferencia de las conversiones para ensayos de dureza (figura 2.15), todavía no se establecen relaciones cuantitativas entre los ensayos Charpy e Izod. Por lo general, los materiales que tienen una alta resistencia al impacto poseen alta resistencia, alta ductilidad y, por consiguiente, alta tenacidad. La sensibilidad a los defectos superficiales (**sensibilidad a la muesca**) es importante porque reduce en forma significativa la tenacidad al impacto, particularmente en metales con tratamiento térmico, materiales cerámicos y vidrios. Los ensayos de impacto son particularmente útiles para determinar la temperatura de transición de dúctil a frágil en los materiales (sección 2.10.1).

2.10 Falla y fractura de los materiales

La **falla** es uno de los aspectos más importantes del comportamiento de los materiales, puesto que influye directamente en la selección de un material para una aplicación particular y en el método o los métodos de manufactura, así como en la determinación de la vida útil del componente. Debido a los diversos factores que intervienen, la falla y la fractura de los materiales constituyen un área de estudio compleja. Esta sección se centra sólo en los aspectos de la falla que son particularmente importantes para la selección y el procesamiento de los materiales.

Existen dos tipos generales de falla:

1. **Fractura**, a través de grietas internas o externas; la fractura se subdivide en dos categorías generales: *dúctil* y *frágil* (figuras 2.21 y 2.22).
2. **Pandeo**, como se muestra en la figura 2.20b.

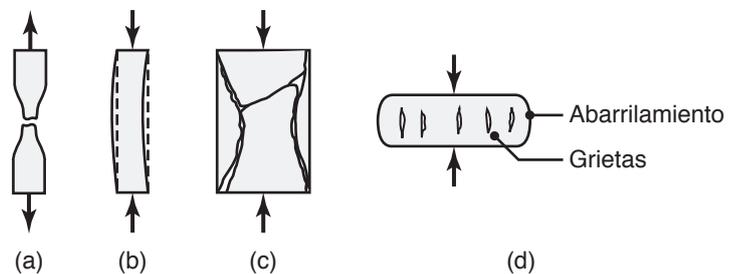


FIGURA 2.20 Ilustración esquemática de los tipos de falla en los materiales: (a) formación de cuello y fractura de los materiales dúctiles, (b) pandeo de los materiales dúctiles bajo una carga de compresión, (c) fractura de los materiales frágiles en compresión y (d) formación de grietas en la superficie abarillada de los materiales dúctiles en compresión.

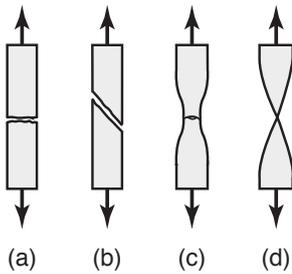


FIGURA 2.21 Ilustración esquemática de los tipos de fractura en tensión: (a) fractura frágil en metales policristalinos; (b) fractura cortante en monocristales dúctiles —vea también la figura 1.6a—; (c) fractura dúctil en copa y cono de metales policristalinos y (d) fractura dúctil completa en metales policristalinos, con reducción de 100% del área.

Aunque la falla de los materiales suele considerarse indeseable, debe tenerse en cuenta que algunos productos están diseñados de tal manera que la falla resulta esencial para su funcionamiento. Ejemplos típicos de esto son: (a) envases de alimentos y bebidas con pestañas o tapas completas que se retiran al romperlas; (b) pasadores de seguridad en los ejes para evitar daños a la maquinaria en caso de sobrecarga; (c) hojas perforadas para facilitar su rasgado a lo largo de una trayectoria y (d) tapas roscadas de metal o plástico para las botellas de bebidas.

2.10.1 Fractura dúctil

La **fractura dúctil** se caracteriza por la *deformación plástica* que precede a la falla (figura 2.20a). En una prueba de tensión, materiales altamente dúctiles como el oro y el plomo pueden formar un cuello hasta cierto punto antes de fallar (figura 2.21d); sin embargo, la mayoría de los metales y aleaciones forman un cuello hasta un área finita y después fallan. La fractura dúctil ocurre generalmente a lo largo de planos en los que el esfuerzo cortante es máximo. Así, en la torsión, por ejemplo, un metal dúctil se fractura a lo largo de un plano perpendicular al eje de giro; es decir, el plano donde el esfuerzo cortante es un máximo. Por el contrario, la fractura en cortante es resultado de un extenso deslizamiento a lo largo de los planos de deslizamiento que ocurren dentro de los granos (vea la figura 1.7).

Un análisis cercano de la superficie de fractura dúctil (figura 2.22) muestra un patrón *fibroso con hoyuelos*, como si se hubiera llevado a cabo una serie de pruebas de tensión muy pequeñas sobre la superficie de fractura. La falla inicia con la formación de pequeños huecos, por lo general alrededor de pequeñas inclusiones o huecos preexistentes, los cuales, a su vez, *crecen* y se *coalescen* formando microgrietas que después aumentan de tamaño y en algún momento conducen a la fractura.

En una probeta para ensayos de tensión, la fractura inicia en el centro de la región del cuello resultando en crecimiento y coalescencia de cavidades (figura 2.23). La región central se convierte en una gran grieta, como puede verse en la sección media de la probeta para ensayos de tensión en la figura 2.23d; esta grieta se propaga entonces hacia la periferia de la región del cuello y resulta en una falla total. Debido a su apariencia, la superficie de fractura de una probeta dúctil para ensayos de tensión se conoce como **fractura en copa y cono**.

Efectos de las inclusiones. Debido a que son sitios de nucleación para los huecos, las *inclusiones* tienen una influencia importante en la fractura dúctil y, por consiguiente, en la capacidad de trabajo (o conformado) de los metales. Por lo general, las inclusiones consisten en impurezas de diversos tipos y en partículas de segunda fase, como óxidos, carburos y sulfuros. El alcance de su influencia depende de factores como su forma, dureza y distribución, así como de su fracción del volumen total; cuanto mayor sea la fracción de volumen de las inclusiones, menor será la ductilidad del material.

Los huecos y la porosidad también se pueden desarrollar durante el procesamiento de los metales, como la porosidad en el proceso de fundición (sección 10.6.1), y durante los procesos de conformado con materiales metálicos, como el estirado y la extrusión que se describen en el capítulo 15. Hay dos factores que afectan la formación de huecos:

1. La resistencia del enlace en la interfase entre una inclusión y la matriz. Si el enlace es fuerte, existe menos tendencia a la formación de huecos durante la deformación plástica.
2. La dureza de la inclusión. Si la inclusión es suave, como en el caso del sulfuro de manganeso, se ajustará al cambio total de forma de la pieza de trabajo durante la deformación plástica. Si la inclusión es dura, como en el caso de los carburos y óxidos (vea también la sección 8.2), podría conducir a la formación de huecos (figura 2.24). Las inclusiones duras también pueden romperse en partículas más pequeñas durante la deformación plástica debido a su naturaleza frágil.

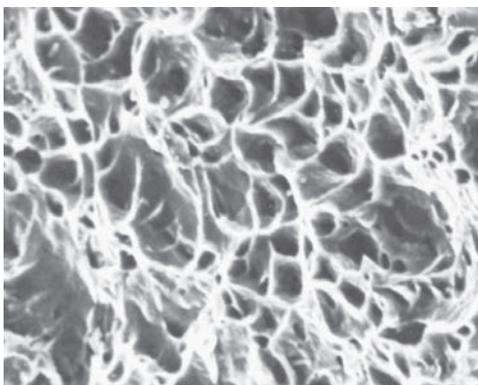


FIGURA 2.22 Superficie de fractura dúctil en acero al bajo carbono mostrando hoyuelos. La fractura suele iniciar en impurezas, inclusiones o huecos preexistentes (microporosidad) en el metal. Fuente: Cortesía de K.-H. Habig y D. Klaffke.

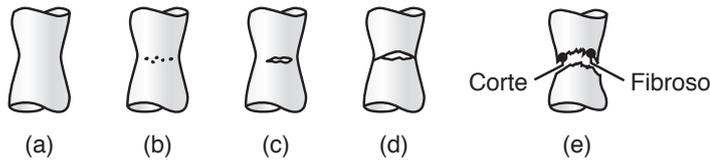


FIGURA 2.23 Secuencia de eventos en la formación del cuello y la fractura de una probeta para ensayo de tensión: (a) primera etapa de formación del cuello; (b) comienzan a formarse pequeños huecos dentro de la región del cuello; (c) los huecos coalescen, produciendo una grieta interna; (d) el resto de la sección transversal comienza a fallar por cortante en la periferia y (e) surge la fractura final, conocida como fractura en copa (superficie de fractura superior) y cono (superficie inferior).

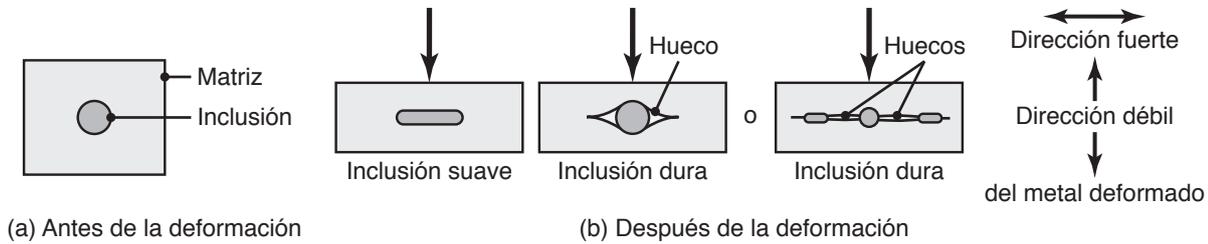


FIGURA 2.24 Ilustración esquemática de la deformación de inclusiones blandas y duras y de su efecto sobre la formación de huecos en la deformación plástica. Observe que, debido a que no se ajustan a la deformación total de la matriz dúctil, las inclusiones duras pueden causar huecos internos.

La alineación de las inclusiones durante la deformación plástica conduce a la **formación mecánica de fibras** (sección 1.6). Por lo tanto, para desarrollar la máxima ductilidad y resistencia, el procesamiento posterior de un material de este tipo debe implicar consideraciones acerca de la dirección correcta para trabajarlo.

Temperatura de transición. Los metales pueden experimentar un cambio brusco en ductilidad y tenacidad en un estrecho rango de temperatura, llamado *temperatura de transición* (figura 2.25). Este fenómeno se produce, sobre todo, en metales cúbicos centrados en el cuerpo y en algunos metales con empaquetamiento hexagonal compacto; se presenta muy pocas veces en metales cúbicos centrados en las caras. La temperatura de transición depende de factores como (a) la composición, la microestructura y el tamaño de grano del material; (b) el acabado superficial y la forma de la muestra y (c) la rapidez de deformación. Con altos valores en la rapidez de deformación, los cambios bruscos en la forma de la pieza y la presencia de muescas superficiales incrementan la temperatura de transición.

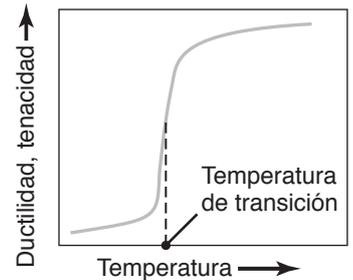


FIGURA 2.25 Ilustración esquemática de la temperatura de transición en los metales.

Envejecimiento por deformación. El *envejecimiento por deformación* es un fenómeno en el que los átomos de carbono presentes en los aceros se segregan hacia las dislocaciones, fijándolas y, de esta manera, incrementando la resistencia a su movimiento; el resultado es una mayor resistencia y menor ductilidad. En vez de presentarse a lo largo de varios días a temperatura ambiente, el envejecimiento por deformación puede ocurrir en sólo unas pocas horas a una temperatura más alta; en tal caso, se denomina *envejecimiento acelerado por deformación*. En los aceros, un ejemplo del envejecimiento acelerado por deformación es la **fragilidad en azul**, llamada así porque se produce en el rango de “calor azul” donde el acero desarrolla una película de óxido azulado. La fragilidad en azul causa una disminución significativa de la ductilidad y la tenacidad y un incremento de la resistencia en los aceros de carbono simple y en algunas aleaciones de acero.

2.10.2 Fractura frágil

La **fractura frágil** ocurre con poca o ninguna deformación plástica bruta. En tensión, la fractura tiene lugar a lo largo del plano cristalográfico (**plano de clivaje**) donde el esfuer-

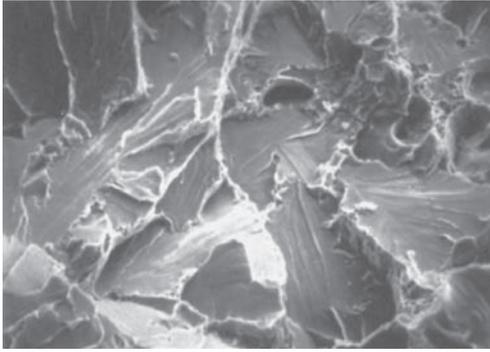


FIGURA 2.26 Superficie de fractura de un acero que ha fallado de manera frágil; la trayectoria de fractura es transgranular (a través de los granos). Ampliación: 200 \times . Fuente: Cortesía de B. J. Schulze y S. L. Meiley y de Packer Engineering Associates, Inc.

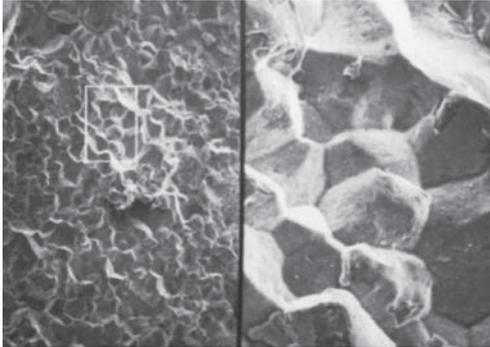


FIGURA 2.27 Fractura intergranular con dos ampliaciones diferentes; los granos y los límites de grano son claramente visibles en esta micrografía. La fractura sigue una trayectoria a lo largo de los límites de grano. Ampliación: izquierda, 100 \times ; derecha, 500 \times . Fuente: Cortesía de B. J. Schulze y S. L. Meiley y de Packer Engineering Associates, Inc.

zo normal de tensión es un máximo. Los metales cúbicos centrados en las caras generalmente no fallan por fractura frágil, mientras que los metales centrados en el cuerpo y algunos con empaquetamiento hexagonal compacto fallan por clivaje. En general, una temperatura baja y una rapidez de deformación alta promueven la fractura frágil.

En un metal policristalino bajo tensión, la superficie de fractura tiene un aspecto granular brillante (a diferencia de la apariencia fibrosa de la fractura dúctil) debido a los cambios en la dirección de los planos de clivaje a medida que la grieta se propaga de un grano a otro (figura 2.26). La fractura frágil en compresión es más compleja; incluso puede seguir una trayectoria que es teóricamente a un ángulo de 45° con respecto a la dirección de la fuerza aplicada.

Dos ejemplos de fractura a lo largo de un plano de clivaje son la división de la sal de roca y el desprendimiento de las capas de mica. Los esfuerzos de tensión normales al plano de clivaje, causados por tensión, inician y controlan la propagación de la fractura. Otro ejemplo es el comportamiento de los materiales frágiles, como la tiza o gis, el hierro fundido gris y el concreto; bajo tensión, fallan de la manera mostrada en la figura 2.21a; en torsión, fallan a lo largo de un plano que forma un ángulo de 45° con el eje de giro (figura 2.10); es decir, a lo largo de un plano donde el esfuerzo de tensión es un máximo.

Defectos. Un factor importante en la fractura es la presencia de defectos, como raspaduras, hendiduras y grietas externas o internas preexistentes. Bajo tensión, la punta aguda de una grieta se somete a altos esfuerzos de tensión que luego causan que la grieta se propague rápidamente.

La presencia de defectos explica por qué los materiales frágiles son más susceptibles en tensión en comparación con su resistencia a la compresión (vea la tabla 8.2). Por ejemplo, la relación de la resistencia a la compresión sobre la resistencia a la tensión es del orden de 10 para las rocas y materiales similares, alrededor de 5 para el vidrio y aproximadamente de 3 para el hierro fundido gris. Bajo esfuerzos de tensión, las grietas se propagan rápidamente causando lo que se conoce como *falla catastrófica*.

En los metales policristalinos, las trayectorias de fractura que se observan con más frecuencia son **transgranulares** (*transcristalinas* o *intragranulares*); es decir, la grieta se propaga a través del grano. En la fractura **intergranular**, la grieta se propaga a lo largo de los límites de grano (figura 2.27); por lo general, esto ocurre cuando los límites de grano son débiles, contienen una fase frágil o han sido debilitados mediante la fragilización por metal líquido o sólido (sección 1.5.2).

Fractura por fatiga. La *fractura por fatiga* suele producirse de una manera frágil. Se desarrollan grietas diminutas externas o internas en hendiduras o defectos preexistentes en el material; estas grietas se propagan con el tiempo y en algún momento conducen a la falla repentina y total de la pieza. Por lo general, debido a su apariencia, la superficie de la fractura por fatiga se define mediante el término **marcas de playa** (figura 2.28). Sin embargo, al ser observada a una magnificación alta (típicamente más de 1000 \times), es posible ver una serie de **estrías** en las superficies de fractura, cada marca de playa consta de varias estrías.

Mejora de la resistencia a la fatiga. La resistencia a la fatiga está influenciada en gran medida por el método usado en la preparación de las superficies de la pieza o parte (figura 2.29). En general, la resistencia a la fatiga de los productos manufacturados puede mejorarse por los métodos siguientes:

1. Inducción de esfuerzos residuales de compresión sobre las superficies; por ejemplo, al granallar o bruñir con rodillo (sección 34.2).
2. Endurecimiento superficial (cementado) por medios diversos (sección 4.10).
3. Acabado superficial fino, reduciendo así los efectos perjudiciales de las muescas y otras imperfecciones de la superficie.
4. Selección de materiales adecuados y aseguramiento de que están libres de cantidades significativas de inclusiones, huecos e impurezas.

De manera inversa, los siguientes factores y procesos pueden *reducir* la resistencia a la fatiga:

1. Esfuerzos residuales de tensión en la superficie.
2. Descarburación.
3. Picaduras superficiales (como las debidas a la corrosión) que actúan como concentradores de esfuerzos.
4. Fragilización por hidrógeno.
5. Galvanizado.
6. Electrodeposición.

Agrietamiento por corrosión por esfuerzo. Un metal, que de otro modo sería dúctil, puede fallar de manera frágil debido al *agrietamiento por corrosión por esfuerzo* (también llamado **agrietamiento por esfuerzo** o **agrietamiento temporal**). Las piezas libres de defectos pueden desarrollar grietas, ya sea a través del tiempo o incluso poco después de ser fabricadas. La propagación de grietas puede ser intergranular o transgranular. La susceptibilidad de los metales al agrietamiento por corrosión por esfuerzo depende principalmente del material, de la presencia y magnitud de *esfuerzos residuales de tensión* y del medio ambiente (medios corrosivos como agua salada o productos químicos).

Entre los metales, el latón y los aceros inoxidable austeníticos son altamente susceptibles al agrietamiento por esfuerzo. El procedimiento habitual para evitar el agrietamiento por corrosión por esfuerzo consiste en *relevar el esfuerzo* de la pieza justo después de haber sido formada. También puede hacerse un recocido completo (sección 4.11), pero este tratamiento reduce la resistencia de las piezas trabajadas en frío.

Fragilización por hidrógeno. La presencia de hidrógeno puede reducir la ductilidad y producir fragilización severa y falla prematura en metales, aleaciones y materiales no metálicos. Este fenómeno, llamado *fragilización por hidrógeno*, resulta especialmente grave en los aceros de alta resistencia. Las posibles fuentes de hidrógeno surgen durante la fusión del metal para el proceso de fundición, durante el lavado químico (eliminación de los óxidos superficiales mediante una reacción química o electroquímica) y durante la electrólisis en la electrodeposición. Otras fuentes de hidrógeno son el vapor de agua en la atmósfera y la humedad en los electrodos y fundentes utilizados durante la soldadura. El oxígeno también puede producir fragilización, particularmente en las aleaciones de cobre.

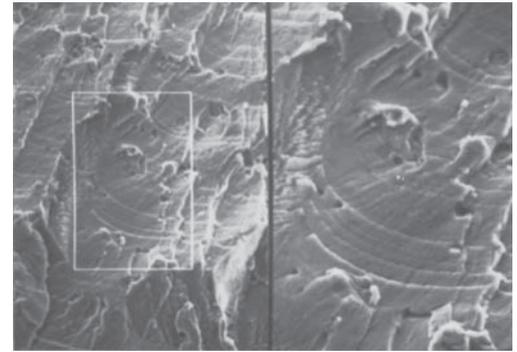


FIGURA 2.28 Superficie metálica típica con fractura por fatiga y que muestra marcas de playa. Magnificación: izquierda, 500x; derecha, 1000x. Fuente: Cortesía de B. J. Schulze y S. L. Meiley y de Packer Engineering Associates, Inc.

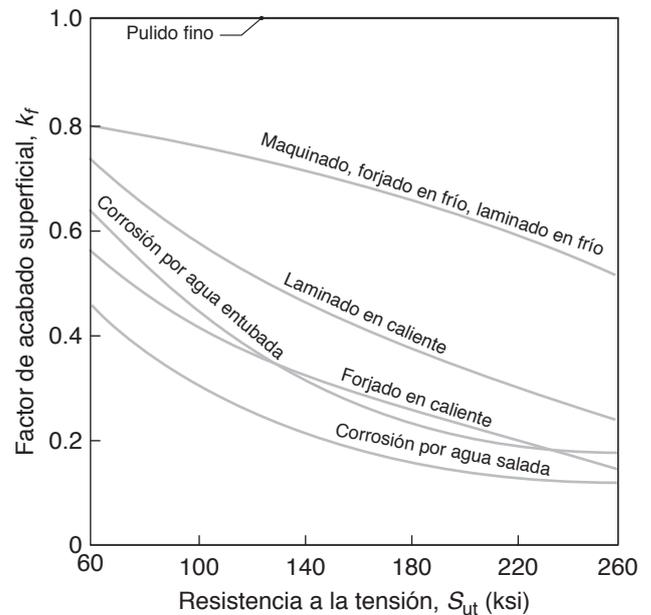


FIGURA 2.29 Reducciones en la resistencia a la fatiga de aceros fundidos sometidos a diversas operaciones de acabado superficial. Observe que la reducción se vuelve mayor a medida que aumenta la rugosidad superficial y la resistencia del acero. Fuente: Reimpreso con autorización de CRC Press, Inc. *Fundamentals of Machine Elements*, 3a. edición de Schmidt, Hamrock y Jacobson; © 2013 Taylor & Francis LLC.

2.11 Esfuerzos residuales

Los **esfuerzos residuales** pueden desarrollarse cuando las piezas de trabajo se someten a una deformación plástica que no es uniforme a lo largo de la pieza; éstos son esfuerzos que permanecen dentro de una pieza después de haberla formado y haber retirado todas las fuerzas externas (aplicadas mediante herramientas y dados o matrices). Un ejemplo típico es la flexión de una barra de metal (figura 2.30). Observe que el momento de flexión externo produce, en primer lugar, una distribución del esfuerzo elástico lineal (figura 2.30a); a medida que el momento aumenta, las fibras exteriores de la barra alcanzan un nivel de esfuerzo lo suficientemente alto como para causar la cedencia (o fluencia). Para un material típicamente endurecido por deformación, al final se alcanza la distribución del esfuerzo mostrada en la figura 2.30b, y entonces la barra experimenta una flexión permanente.

Eliminemos el momento de flexión externo de la barra. Esta operación es equivalente a aplicar un momento igual pero opuesto sobre la barra; así, los momentos de las áreas oab y oac presentes en la figura 2.30c deben ser iguales. La línea oc , que representa el momento de flexión opuesto, es lineal porque todas las descargas y recuperaciones son *elásticas* (vea la figura 2.3). La diferencia entre las dos distribuciones de esfuerzo proporciona el patrón de esfuerzo residual que hay dentro de la barra, como se muestra en la figura 2.30d.

Observe la presencia de esfuerzos residuales de compresión en las capas ad y oe y de esfuerzos residuales de tensión en las capas do y ef . Debido a que ya no hay fuerzas externas aplicadas a la barra, las fuerzas internas resultantes de estos esfuerzos residuales deben estar en equilibrio estático. Debe señalarse que, aunque este ejemplo sólo involucra esfuerzos residuales en la dirección longitudinal de la barra, en la mayoría de los casos los esfuerzos residuales son tridimensionales y, por lo tanto, más difíciles de analizar.

La eliminación de una capa de material de las superficies de la barra, ya sea por maquinado o esmerilado, perturbará el equilibrio de los esfuerzos residuales que se muestran en la figura 2.30d. Entonces, la barra adquirirá un nuevo radio de curvatura con el fin de equilibrar las fuerzas internas. Tales perturbaciones de los esfuerzos residuales causan **alabeo** de las piezas (figura 2.31). El equilibrio de los esfuerzos residuales también puede ser perturbado por la *relajación* de estos esfuerzos durante un periodo determinado, lo cual estudiamos un poco más adelante.

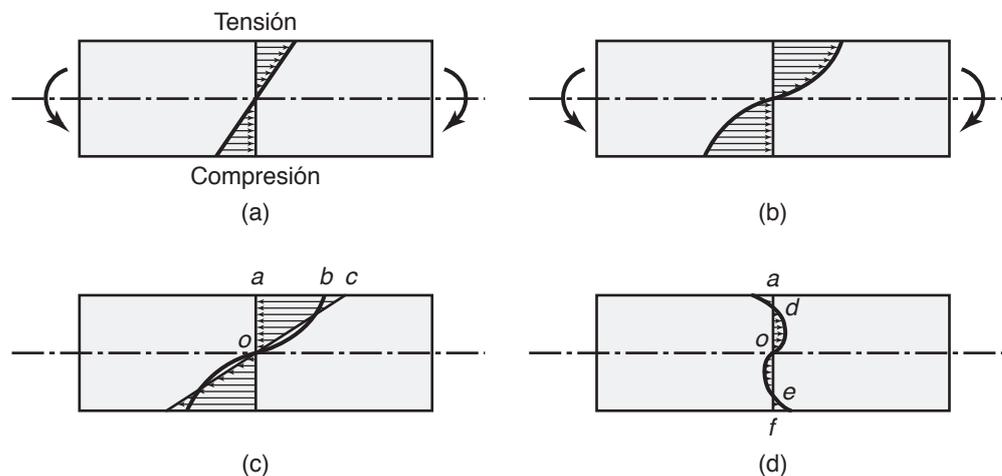


FIGURA 2.30 Esfuerzos residuales desarrollados al doblar una viga con sección transversal rectangular; observe que las fuerzas horizontales y los momentos causados por los esfuerzos residuales en la viga deben equilibrarse internamente. Debido a la deformación no uniforme, especialmente durante las operaciones de trabajo en frío en metales, la mayoría de las piezas desarrollan esfuerzos residuales.

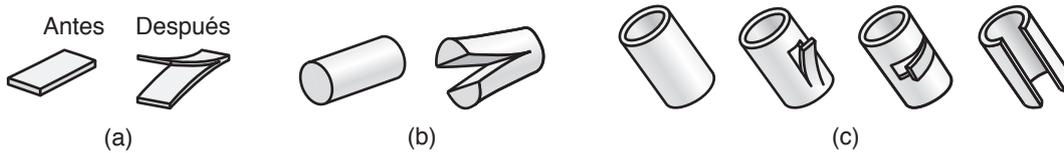


FIGURA 2.31 Distorsión de piezas con esfuerzos residuales después de cortar o ranurar: (a) hoja plana o placa, (b) barra redonda sólida y (c) tubería o tubos de pared delgada.

Los esfuerzos residuales también pueden desarrollarse mediante *gradientes de temperatura* dentro de la pieza, como ocurre durante el enfriamiento de una fundición o un forjado en caliente. Las expansiones y contracciones locales causadas por los gradientes de temperatura dentro de la pieza producen una deformación no uniforme, tal como se describe en la flexión permanente de una viga.

Por lo general, los esfuerzos residuales de tensión presentes en la superficie de una pieza son indeseables puesto que reducen su resistencia a la fatiga y a la fractura. Esto se debe a que una superficie con esfuerzos residuales de tensión no puede sostener esfuerzos tensiles adicionales (provenientes de fuerzas externas) tan altos como los que puede resistir una superficie libre de esfuerzos residuales. Esta reducción en la resistencia es particularmente característica de los materiales frágiles o menos dúctiles, en los que la fractura se presenta con poca o ninguna deformación plástica antes de su aparición.

Los esfuerzos residuales de tensión también pueden conducir, durante un periodo determinado, al *agrietamiento por esfuerzo* o *agrietamiento por corrosión-esfuerzo* de las piezas (sección 2.10.2). Por otra parte, esfuerzos residuales de compresión sobre una superficie suelen ser deseables. De hecho, con el fin de aumentar la resistencia a la fatiga de los componentes, es posible impartir esfuerzos residuales de compresión sobre las superficies mediante técnicas como el granallado y el laminado superficial (sección 34.2).

Reducción y eliminación de esfuerzos residuales. Los esfuerzos residuales se pueden reducir o eliminar ya sea mediante el *recocido para el alivio de esfuerzos* (sección 4.11) o aplicando una *deformación plástica* adicional de la pieza, como su estiramiento. Con tiempo suficiente, los esfuerzos residuales también pueden disminuirse a temperatura ambiente utilizando la *relajación* de los esfuerzos residuales. El tiempo requerido para la relajación puede reducirse en gran medida al aumentar la temperatura de la pieza de trabajo.

2.12 Trabajo, calor y temperatura

Casi todo el trabajo mecánico aplicado en la deformación plástica se convierte en **calor**. Sin embargo, esta conversión no es completa puesto que una parte del trabajo se almacena en el material deformado en forma de energía elástica, la cual es conocida como **energía almacenada** (sección 1.7). Por lo general, esto representa entre 5 y 10% de la entrada total de energía; sin embargo, en algunas aleaciones puede llegar a ser hasta del 30 por ciento.

En un proceso de deformación simple sin fricción, donde se supone que el trabajo se convierte completamente en calor, el *aumento de temperatura* teórico (adiabático), ΔT , en la pieza de trabajo está dado por

$$\Delta T = \frac{u}{\rho c}, \quad (2.16)$$

donde u es la **energía específica** (trabajo de deformación por unidad de volumen), ρ es la densidad y c es el calor específico del material. Se puede observar que las temperaturas más altas se asocian con grandes áreas que están bajo la curva de esfuerzo-deformación

y tienen valores pequeños de calor específico. Sin embargo, propiedades físicas como el calor específico y la conductividad térmica (capítulo 3) también pueden depender de la temperatura; por lo tanto, deben tenerse en cuenta al realizar los cálculos.

El aumento de la temperatura para una deformación real de 1 (como la que se produce en una probeta con 27 mm de altura cuando se comprime hasta 10 mm) puede calcularse como: 75 °C (165 °F) para el aluminio; 140 °C (285 °F) para el cobre; 280 °C (535 °F) para el acero al bajo carbono y 570 °C (1060 °F) para el titanio. En operaciones metalúrgicas reales, el calor se pierde en el ambiente, en las herramientas y dados o matrices y en los lubricantes o refrigerantes utilizados en el proceso. Si la deformación se lleva a cabo rápidamente, las pérdidas de calor serán relativamente pequeñas durante ese breve periodo; por otra parte, si el proceso se realiza lentamente, el aumento de temperatura real será sólo una fracción del valor calculado.

RESUMEN

- Numerosos procesos de fabricación involucran el conformado de materiales por deformación plástica; en consecuencia, propiedades mecánicas tales como la resistencia (resistencia a la cedencia o fluencia, Y , y resistencia máxima a la tensión, UTS); el módulo de elasticidad, E ; la ductilidad (elongación y reducción totales del área); la dureza y la energía requerida para la deformación plástica son factores importantes. Estas propiedades dependen, en diversos grados, del material particular y de su condición, temperatura, rapidez de deformación, estado superficial y de las condiciones del medio ambiente.
- Debido a su relativa simplicidad, el ensayo de tensión es el más utilizado para determinar las propiedades mecánicas. A partir de estos ensayos, se construyeron curvas de esfuerzo real-deformación real que son necesarias para determinar el coeficiente de resistencia (K), el exponente de endurecimiento por deformación (n), el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación (m) y la tenacidad de los materiales.
- Los ensayos de compresión tienden a ser imprecisos debido a la presencia de la fricción y el abarrilamiento resultantes en la muestra. Los ensayos de torsión se realizan con probetas tubulares sometidas a giros. Los ensayos de flexión o doblado se utilizan comúnmente en materiales frágiles con el fin de determinar su módulo de ruptura o su resistencia a la ruptura transversal.
- Es posible utilizar varios ensayos de dureza para determinar la resistencia de un material a la indentación o a las raspaduras permanentes. La dureza está relacionada con la fuerza y la resistencia al desgaste de un material, pero no es una propiedad fundamental.
- Los ensayos de fatiga indican el límite de resistencia a la fatiga o el límite de fatiga de los materiales; es decir, el máximo esfuerzo al que un material puede ser sometido sin falla por fatiga, independientemente del número de ciclos. Algunos materiales no tienen límite de fatiga; su esfuerzo permisible debe ser reportado con respecto al número de ciclos de carga.
- La termofluencia es la deformación permanente de un componente bajo una carga estática mantenida durante un periodo determinado. En tensión, la probeta o muestra falla por ruptura en algún momento (formando un cuello y fracturándose).
- Los ensayos de impacto determinan la energía requerida para romper completamente una probeta, esta energía es la llamada tenacidad al impacto del material. Los ensayos de impacto también son útiles para determinar la temperatura de transición de los materiales.
- La falla y la fractura constituyen un aspecto importante del comportamiento de un material cuando se somete a deformación durante las operaciones de trabajo (o conformado) con metales. La fractura dúctil se caracteriza por una deformación plástica

que precede a la fractura y requiere una cantidad considerable de energía. La fractura frágil puede resultar catastrófica porque no está precedida por una deformación plástica; sin embargo, requiere mucha menos energía que la fractura dúctil. Las impurezas, inclusiones y huecos juegan un papel importante en la fractura de los materiales.

- Los esfuerzos residuales son aquellos que permanecen en una pieza de trabajo después de que ésta ha sido deformada plásticamente y luego de que se han retirado todas las fuerzas externas. Por lo general, los esfuerzos residuales de tensión en la superficie son indeseables y pueden reducirse o eliminarse mediante el recocido para el alivio de esfuerzos, la deformación plástica adicional o la relajación durante un periodo determinado.

TÉRMINOS CLAVE

Ablandamiento por deformación	Ensayo Charpy	Falla por fatiga	Relación (o módulo) de Poisson
Agrietamiento por corrosión por esfuerzo	Ensayo de dureza Shore	Fatiga	Relajación del esfuerzo
Carga de impacto	Ensayo de torsión	Fractura	Resistencia a la flexión
Coefficiente de resistencia	Ensayo Izod	Fractura dúctil	Resistencia máxima a la tensión (Resistencia última a la tensión, UTS)
Compresión	Ensayo Leeb	Fractura frágil	Ruptura
Cortante	Envejecimiento por deformación	Fragilidad en azul	Superplasticidad
Defectos	Esfuerzo de cedencia (o fluencia)	Inclusiones	Temperatura de transición
Deformación ingenieril	Esfuerzo ingenieril	Microdureza	Tenacidad
Deformación real	Esfuerzo real	Módulo de corte	Tensión
Ductilidad	Esfuerzos residuales	Módulo de elasticidad	Termofluencia
Dureza	Exponente de endurecimiento por deformación	Módulo de rigidez	Velocidad de deformación
Durómetro	Exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación	Módulo de ruptura	
Efecto Bauschinger		Pandeo	
Elongación		Prueba de disco	
		Rapidez de deformación	
		Reducción de área	

BIBLIOGRAFÍA

- Ashby, M. F., *Materials Selection in Mechanical Design*, 4a. ed., Butterworth-Heinemann, 2010.
- Ashby, M. F. y Jones, D. R. H., *Engineering Materials*, Vol. 1: *An Introduction to Properties, Applications, and Microstructure*, 4a. ed., 2012; Vol. 2: *An Introduction to Microstructures and Processing*, Butterworth-Heinemann, 2012.
- Ashby, M., Shercliff, H. y Cebon, D., *Materials: Engineering, Science, Processing and Design*, 2a. ed., Butterworth-Heinemann, 2009.
- Askeland, D. R., Fulay P. P. y Wright, W. J., *The Science and Engineering of Materials*, 6a. ed., CL Engineering, 2010.
- ASM Handbook*, Vol. 8: *Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International, 2000.
- Budinski, K. G. y Budinski, M. K., *Engineering Materials: Properties and Selection*, 9a. ed., Prentice Hall, 2009.
- Callister, W. D., Jr. y Rethwisch, D. G., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8a. ed., Wiley, 2010.
- Chandler, H., *Hardness Testing*, 2a. ed., ASM International, 1999.
- Courtney T. H., *Mechanical Behavior of Materials*, 2a. ed., Waveland Press, 2005.
- Davis, J. R. (ed.), *Tensile Testing*, 2a. ed., ASM International, 2004.
- Dowling, N. E., *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, 3a. ed., Prentice Hall, 2006.
- Herrmann, K. (ed.), *Hardness Testing: Principles and Applications*, ASM International, 2011.
- Hosford, W. F., *Mechanical Behavior of Materials*, Cambridge, 2005.
- Shackelford, J. F., *Introduction to Materials Science for Engineers*, 7a. ed., Prentice Hall, 2008.
- Tamarin, Y., *Atlas of Stress-Strain Curves*, 2a. ed., ASM International, 2002.
- Wulpi, D. J., *Understanding How Components Fail*, 2a. ed., ASM International, 1999.

PREGUNTAS DE REPASO

- 2.1** Distinga entre esfuerzo ingenieril y esfuerzo real.
- 2.2** En una curva de esfuerzo-deformación, ¿cuál es el límite proporcional? ¿Es diferente al punto de cedencia o fluencia?
- 2.3** Describa los eventos que tienen lugar cuando una probeta se somete a un ensayo de tensión. Dibuje una curva de esfuerzo-deformación factible e identifique todas las regiones importantes y los puntos entre las regiones. Suponga que la carga continúa hasta la fractura.
- 2.4** ¿Qué es la ductilidad y cómo se mide?
- 2.5** En la ecuación $\sigma = K\epsilon^n$, la cual representa la curva de esfuerzo-deformación real para un material, ¿cuál es el significado del exponente n ?
- 2.6** ¿Qué es la sensibilidad a la velocidad de deformación y cómo se mide?
- 2.7** ¿Qué ensayo puede medir las propiedades de un material sometido a deformación cortante?
- 2.8** ¿Qué procedimientos de prueba pueden utilizarse para medir las propiedades de materiales frágiles, como los cerámicos y los carburos?
- 2.9** Describa las diferencias entre la ruptura frágil y la dúctil.
- 2.10** ¿Qué es la dureza? Explique.
- 2.11** Describa las características de un ensayo de dureza Rockwell.
- 2.12** ¿Qué es un ensayo Leeb? ¿En qué se diferencia de un ensayo de dureza Rockwell A?
- 2.13** Distinga entre relajación del esfuerzo y termofluencia.
- 2.14** Describa la diferencia entre el comportamiento elástico y el plástico.
- 2.15** Explique qué significa una elongación uniforme en los ensayos de tensión.
- 2.16** Describa la diferencia entre rapidez de deformación y velocidad de deformación. ¿Qué unidades tiene cada una?
- 2.17** Describa las dificultades que implica la realización de un ensayo de compresión.
- 2.18** ¿Qué es la ley de Hooke? ¿El módulo de Young? ¿La relación (o módulo) de Poisson?
- 2.19** Describa la diferencia entre la fractura transgranular y la intergranular.
- 2.20** ¿Cuál es la razón por la que la resistencia a la cedencia (o fluencia) se define generalmente como el 0.2% de compensación?
- 2.21** ¿Por qué la resistencia a la fatiga de una probeta o una pieza depende de su acabado superficial?
- 2.22** Si mediante un examen microscópico se observan estrías en una superficie de fractura, ¿qué sugiere esto sobre el modo de fractura?
- 2.23** ¿Qué es el ensayo Izod? ¿Por qué son útiles los ensayos Izod?
- 2.24** ¿Por qué aumenta la temperatura durante la deformación plástica?
- 2.25** ¿Qué es el esfuerzo residual? ¿Cómo pueden eliminarse los esfuerzos residuales?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 2.26** En una misma escala de esfuerzo, la curva de esfuerzo real-deformación real en tensión es superior a la curva de esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril. Explique si esta condición también se aplica a un ensayo de compresión.
- 2.27** ¿Cuáles son las similitudes y diferencias entre deformación y esfuerzo?
- 2.28** ¿Puede un material tener una relación de Poisson negativa? Argumente su respuesta.
- 2.29** Se ha establecido que cuanto mayor sea el valor de m , más difuso será el cuello; de igual modo, cuanto menor sea el valor de m , más localizado estará el cuello. Explique la razón de este comportamiento.
- 2.30** Explique por qué, cuando se estiran lentamente, los materiales con altos valores de m , como el vidrio caliente y la Silly Putty®, sufren grandes elongaciones antes de la falla. Considere los eventos que ocurren en la zona del cuello de la probeta.
- 2.31** Explique, mediante un bosquejo sencillo, si es necesario utilizar el método de compensación para determinar el esfuerzo de cedencia, Y , de un material que ha sido altamente trabajado en frío.
- 2.32** Explique por qué la diferencia entre la deformación ingenieril y la deformación real se hace más grande a medida que aumenta la deformación. ¿Se produce esta diferencia tanto para la deformación en tensión como para la que se origina en compresión? Explique su respuesta.
- 2.33** Considere un elastómero, tal como una banda de goma. Este material puede someterse a una gran deformación elástica antes de la falla, pero después de la fractura recupera por completo su forma original. ¿Este material es frágil o dúctil? Explique su respuesta.
- 2.34** Si un material (por ejemplo el aluminio) no tiene límite de endurecimiento, ¿cómo estimaría usted su resistencia a la fatiga?
- 2.35** ¿Qué papel, si posee alguno, tiene la fricción en un ensayo de dureza? Explique.
- 2.36** ¿Qué ensayos de dureza y escalas usaría usted para unas tiras de metal muy delgadas, por ejemplo de papel de aluminio? Explique.
- 2.37** Considere la circunstancia en la que se realiza un ensayo de dureza Vickers sobre un material. Dibuje la forma de la indentación resultante si existe un esfuerzo residual en la superficie.
- 2.38** Entre dos ensayos, uno de tensión y otro de compresión, ¿cuál requeriría mayor capacidad de la máquina de ensayos y por qué?
- 2.39** Describa y explique brevemente las condiciones que inducen la fractura frágil en un metal que de otro modo sería dúctil.
- 2.40** Enumere los factores que usted consideraría al seleccionar un ensayo de dureza. Explique por qué.
- 2.41** Con base en la figura 2.5, ¿es posible calcular el porcentaje de elongación de los materiales descritos? Explique su respuesta.

2.42 Si una probeta metálica para ensayos de tensión se jala y se rompe rápidamente, ¿dónde sería más alta la temperatura y por qué?

2.43 Comente sus observaciones sobre el contenido de la tabla 2.2.

2.44 ¿El ensayo de disco sería aplicable para un material dúctil? ¿Por qué sí o por qué no?

2.45 ¿Qué ensayo de dureza es adecuado para determinar la dureza de un recubrimiento cerámico delgado sobre una pieza de metal?

2.46 Un cable consta de muchos alambres que se doblan y desdoblán a medida que el cable pasa sobre una polea. Se investiga una falla de este cable metálico y se encuentra que algunos de los alambres, al examinarlos bajo un microscopio electrónico, despliegan fallas superficiales en copa y cono mientras otros muestran fracturas superficiales transgranulares. Aporte su opinión sobre estas observaciones.

2.47 Se realiza un muestreo estadístico de los ensayos de dureza Rockwell C ejecutados sobre un material y se determina que el material está defectuoso debido a su dureza insuficiente. El proveedor afirma que los ensayos son erróneos porque proba-

blemente el indentador de cono de diamante estaba sin punta. ¿Éste es un reclamo válido? Explique su respuesta.

2.48 En un ensayo de dureza Brinell se encuentra que la impresión resultante es elíptica. Proporcione las explicaciones posibles para este resultado.

2.49 Ciertos recubrimientos son extremadamente delgados, algunos hasta de unos cuantos nanómetros. Explique por qué incluso el ensayo Knoop no es capaz de dar resultados confiables para estos recubrimientos. Investigaciones recientes han tratado de utilizar diamantes pulidos (con un radio de punta aproximado de 5 nm) para indentar tales recubrimientos en microscopios de fuerza atómica. ¿Qué preocupaciones tiene usted con respecto a la validez de los resultados de estos ensayos?

2.50 Seleccione un ensayo de dureza adecuado para cada uno de los siguientes materiales y justifique su respuesta:

- Nitruro de boro cúbico.
- Plomo.
- Acero estirado en frío 0.5% C.
- Diamante.
- Caramelo.
- Granito.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

2.51 Un clip para papel está hecho de alambre con 0.5 mm de diámetro. Si el material original del que está hecho el alambre es una varilla de 25 mm de diámetro, calcule las deformaciones longitudinales ingenieril y real a las que ha sido sometido el alambre durante el procesamiento.

2.52 Una tira metálica con 250 mm de longitud se estira en dos pasos, primero hasta 300 mm y luego hasta 400 mm. Demuestre que la deformación real total es la suma de las deformaciones reales ocurridas en cada paso; en otras palabras, las deformaciones reales son aditivas. Demuestre que, en el caso de las deformaciones ingenieriles, éstas no pueden sumarse para obtener la deformación total.

2.53 Identifique los dos materiales presentados en la figura 2.5 que tienen las elongaciones uniformes más baja y más alta. Calcule estas cantidades en porcentajes de las longitudes calibradas originales.

2.54 Grafique la resistencia máxima contra la rigidez de los materiales descritos en la tabla 2.2 y prepare una gráfica tridimensional de estos materiales donde el tercer eje represente su elongación máxima en 50 mm.

2.55 Si usted remueve la capa de material *ad* de la pieza que se muestra en la figura 2.30d (por ejemplo, mediante maquinado o esmerilado), ¿de qué forma se curvaría la probeta? (*Sugerencia:* Suponga que la pieza mostrada en el bosquejo *d* de la figura se compone de cuatro resortes horizontales sostenidos en sus extremos. Así, de arriba hacia abajo, usted tiene resortes de compresión, tensión, compresión y tensión).

2.56 Demuestre que la deformación real en la formación del cuello es igual al exponente de endurecimiento por deformación.

2.57 El porcentaje de elongación se define siempre en términos de la longitud calibrada original, por ejemplo 50 mm o 2 pulg. Explique la manera en que variaría la elongación porcentual a medida que aumenta la longitud calibrada en las probetas para los ensayos de tensión. (*Sugerencia:* Recuerde que la formación del cuello es un fenómeno *local*).

2.58 Haga un bosquejo que muestre la naturaleza y distribución de los esfuerzos residuales en las figuras 2.31a y b antes de cortar el material. (*Sugerencia:* Suponga que las piezas separadas están libres de esfuerzos y después haga que estas piezas tomen de nuevo la forma que tenían originalmente).

2.59 Se le dan los valores *K* y *n* de dos metales diferentes. ¿Es esta información suficiente para determinar cuál metal es más tenaz? Si no es así, ¿qué información adicional necesita?

2.60 Un cable está hecho de dos hilos con diferentes secciones transversales y distintos materiales, *A* y *B*, a saber:

Para el material *A*, $K = 60\,000$ psi, $n = 0.5$, $A_o = 0.6$ pulg²;

para el material *B*, $K = 30\,000$ psi, $n = 0.5$, $A_o = 0.3$ pulg².

Calcule la fuerza de tensión máxima que este cable puede soportar antes de la formación de un cuello.

2.61 Con base en la información proporcionada en la figura 2.5, calcule la resistencia máxima a la tensión (ingenieril) del acero inoxidable 304.

2.62 En una prueba de disco realizada sobre una probeta de 1.00 pulg de diámetro y 1/4 pulg de espesor, la probeta se fractura a un esfuerzo de 40 000 psi. ¿Cuál fue la carga aplicada sobre la probeta?

2.63 Una pieza de acero tiene una dureza de 300 HB. Calcule su resistencia a la tensión en MPa y en psi.

2.64 Un metal tiene las siguientes propiedades: UTS = 70 000 psi y $n = 0.20$. Calcule su coeficiente de resistencia, *K*.

2.65 Usando sólo la figura 2.5, calcule la carga máxima en ensayos de tensión para una probeta de cobre recocido con un diámetro original de 5 mm.

2.66 Estime los módulos de resiliencia para una pieza de acero altamente trabajado en frío que tiene una dureza de 250 HB y para una pieza de cobre altamente trabajado en frío con una dureza de 100 HRB.

2.67 Un metal tiene un coeficiente de resistencia $K = 100\,000$ psi y $n = 0.25$. Suponiendo que una probeta para pruebas de tensión hecha de este metal comienza a formar un cuello a una deformación real de 0.25, demuestre que su resistencia máxima a la tensión es de 59 340 psi.

2.68 Grafique las curvas de esfuerzo real-deformación real para los materiales descritos en la tabla 2.3.

2.69 La especificación de diseño de un metal requiere una dureza mínima de 80 HRA. Si se realiza un ensayo de dureza Rockwell y la profundidad de penetración es de $60\ \mu\text{m}$, ¿el material es aceptable?

2.70 Calcule los ángulos mayor y menor de una pirámide para indentador Knoop y compare sus resultados con los obtenidos para los indentadores Vickers y Rockwell A.

2.71 Si un material tiene una dureza meta de 300 HB, ¿cuál es el diámetro de la indentación esperada?

2.72 Se realizó un ensayo de dureza Rockwell A en un material y se registró una profundidad de penetración de 0.15 mm. ¿Cuál es la dureza del material? ¿Qué material tendría típicamente tal valor de dureza? ¿Qué material tendría típicamente tal valor de dureza? Si se realizara un ensayo de dureza Brinell sobre este material, proporcione una estimación del diámetro de indentación si la carga utilizada fuera de 1500 kg.

2.73 Para un acero al 0.5% de carbono estirado en frío, ¿cuál de los ensayos, Rockwell C o Brinell, con 500 kg resultaría en una penetración más profunda?

2.74 Un material se ensaya en tensión. En una longitud calibrada de 1 pulg, las medidas de deformación ingenieril son 0.01, 0.02,

0.03, 0.04, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.5 y 1.0. Grafique la deformación real contra la deformación ingenieril para estas lecturas.

2.75 Una barra horizontal rígida $c-c$ soporta a la probeta a a tensión y a la probeta b a compresión sin fricción de modo que la barra se mantiene horizontal (vea la figura P2.75). La fuerza F se localiza a una relación de distancia de 2:1. Ambas probetas tienen un área de sección transversal original de $1\ \text{pulg}^2$ y las longitudes originales son $a = 8\ \text{pulg}$ y $b = 4.5\ \text{pulg}$. El material para la probeta a tiene una curva de esfuerzo real-deformación real de $\sigma = 100\,000\ \epsilon^{0.5}$. Grafique la curva de esfuerzo real-deformación real que debe tener el material de la probeta b para que la barra permanezca horizontal.

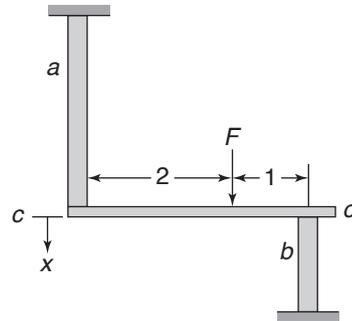


FIGURA P2.75

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

2.76 Describa y explique las propiedades mecánicas deseables de (a) un cable de ascensor, (b) un clip para papel, (c) un resorte de lámina para un camión, (d) un soporte para una estantería, (e) una cuerda de piano, (f) una percha de alambre, (g) el clip para una pluma y (h) una grapa.

2.77 Al hacer una hamburguesa habrá observado el tipo de grietas mostradas en la figura 2.20d. ¿Qué haría usted para evitar esas grietas? [Nota: Realice una prueba en la carne de las hamburguesas aplicándoles compresión a diferentes temperaturas y observe la trayectoria de la grieta que aparezca (es decir, el camino a través de las partículas de grasa, las partículas de carne o su interfase)].

2.78 Un material arcilloso barato llamado Silly Putty suele estar disponible en las tiendas que venden juguetes y juegos. Obtenga una muestra y realice los siguientes experimentos: (a) forme una bola y déjela caer sobre una superficie plana; (b) vuelva a redondear la bola y coloque un libro pesado sobre ella durante un minuto y (c) forme una vara larga con la masilla y estírela, primero lentamente y después en forma rápida. Describa sus observaciones, en referencia a las secciones específicas de este capítulo, donde cada observación particular sea relevante.

2.79 Haga bosquejos individuales de los mecanismos de las máquinas de prueba que, en su opinión, serían apropiadas para los ensayos de tensión, torsión y compresión de probetas con

diferentes velocidades de deformación. ¿Qué modificaciones haría usted en estas máquinas para incluir los efectos de la temperatura sobre las propiedades del material?

2.80 En los ensayos de tensión con probetas suelen usarse instrumentos mecánicos y electrónicos para medir su elongación. Haga bosquejos de los instrumentos que serían adecuados para este propósito y comente sobre su exactitud. ¿Qué modificaciones haría a esos instrumentos para incluir el uso de probetas a temperaturas elevadas?

2.81 Obtenga piezas pequeñas de diferentes materiales metálicos y no metálicos, incluyendo piedras. Frótelas entre sí. Observe las raspaduras realizadas y ordénelas de una manera similar al sistema de numeración de la dureza Mohs.

2.82 Demuestre el fenómeno de relajación del esfuerzo mediante el estiramiento de cuerdas delgadas de plástico entre dos clavos colocados en los extremos de una pieza larga de madera. Pulse las cuerdas con frecuencia para probar la tensión en función del tiempo. Repita la prueba a una temperatura superior colocando el conjunto en un horno a nivel bajo de operación.

2.83 Demuestre la tenacidad al impacto de un trozo de tiza o gis redondo usando primero una lima triangular para producir una muesca en V en la superficie cilíndrica (como se muestra en la figura 2.19a) y después doblando la tiza hasta romperla.

2.84 Con una banda de goma grande y un juego de pesas, obtenga la curva de fuerza-desplazamiento para la banda de goma. ¿El resultado es diferente de las curvas de esfuerzo-deformación que se muestran en la figura 2.4? Comente.

2.85 Diseñe un protocolo de prueba para obtener el trabajo de deformación plástica mediante la medición de la elevación de temperatura en una pieza de trabajo, suponga que no hay pérdida de calor y que la distribución de la temperatura es uniforme en toda la pieza. Si el calor específico del material disminuye al aumentar la temperatura, ¿el trabajo de deformación calculado utilizando el calor específico a temperatura ambiente será mayor o menor que el trabajo real efectuado? Explique su respuesta.

2.86 Encuentre o prepare algunas piezas sólidas circulares de materiales frágiles, como yeso, cerámica, etc., y sométalas al tipo de ensayo que se muestra en la figura 2.9 utilizando las mordazas de una prensa de banco simple. Describa sus observaciones acerca de cómo se fracturan los materiales. Repita los ensayos usando materiales dúctiles, como arcilla, metales blandos, etc., y describa sus observaciones.

2.87 Tome varias bandas de goma y estírelas a diferentes temperaturas, incluyendo el estado de congelación. Comente el comportamiento de las bandas, ¿es dúctil o frágil?

2.88 Diseñe un dispositivo sencillo para realizar los ensayos de flexión mostrados en la figura 2.11. Pruebe palitos de diversos materiales frágiles cargándolos con pesos muertos hasta que se rompan. Verifique la afirmación del texto acerca de que las probetas ubicadas a la derecha de la figura se fracturan antes que las de la izquierda.

2.89 Presione un pequeño cojinete de bolas contra las superficies de diversos materiales, como arcilla y masa, y observe la

forma de la indentación con una lupa, en referencia a las formas que se muestran en las figuras 2.14a y b.

2.90 Describa sus observaciones en relación con la figura 2.14c.

2.91 Incruste una pequeña bola de acero en un bloque de material blando como la arcilla y comprímala como se muestra en la figura 2.24a. Después, corte la arcilla cuidadosamente a lo largo del plano central y observe la deformación del material. Repita el experimento incrustando una pieza redonda de caramelo suave en la arcilla para deformar el material. Comente sobre sus observaciones.

2.92 Diseñe un experimento sencillo y realice pruebas o ensayos en los materiales que se encuentran comúnmente en casa, doblándolos a diferentes temperaturas para realizar una evaluación cualitativa de su temperatura de transición, tal como se muestra en la figura 2.25.

2.93 Obtenga algunas piezas tubulares sólidas de metal y córtelas como se muestra en la figura 2.31. Comente acerca de la existencia de esfuerzos residuales en las piezas antes de cortarlas.

2.94 Explique cómo podría obtenerse una estimación de la dureza de un nanotubo de carbono (vea la sección 8.6.2).

2.95 Defina módulo de elasticidad sin usar las palabras “esfuerzo” o “deformación”.

2.96 Se sabe que es relativamente fácil someter una muestra o probeta a compresión hidrostática, por ejemplo usando una cámara llena con un líquido. Idee usted un medio por el cual una muestra (digamos en la forma de un cubo o un disco redondo) puede someterse a tensión hidrostática o a una aproximación de este estado de esfuerzo. (Tenga en cuenta que una carcasa esférica con pared delgada, presurizada internamente, no es una respuesta correcta porque la muestra sólo estaría sometida a un estado de esfuerzo plano).

Propiedades físicas de los materiales

3.1	Introducción	88
3.2	Densidad	89
3.3	Punto de fusión	92
3.4	Calor específico	92
3.5	Conductividad térmica	93
3.6	Dilatación térmica	93
3.7	Propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas	94
3.8	Resistencia a la corrosión	95

CASO DE ESTUDIO:

3.1	Selección de materiales para acuñar monedas	97
-----	---	----

- Las propiedades físicas pueden tener varias funciones importantes en la selección, el procesamiento y el uso de los materiales. Pueden ser factores clave para determinar qué tan adecuado es un material para aplicaciones específicas, especialmente cuando se considera de manera simultánea con sus propiedades mecánicas.
- Se analizan, a modo de ejemplo, las relaciones entre la resistencia y el peso y la rigidez y el peso en el contexto del diseño de materiales ligeros o de baja densidad, una consideración importante en las industrias aeroespacial y automotriz.
- Después se presentan las propiedades térmicas, eléctricas, magnéticas y ópticas.
- Se describe la importancia de la corrosión y de los materiales resistentes a la corrosión.
- Se consideran las implicaciones de todas las propiedades físicas en el diseño y la manufactura y se proporcionan varios ejemplos concretos.

3.1 Introducción

¿Por qué el cableado eléctrico generalmente está hecho de cobre? ¿Por qué el aluminio, el acero inoxidable y el cobre suelen usarse en los utensilios de cocina? ¿Por qué los mangos de los utensilios de cocina usualmente están hechos de madera o de plástico mientras que otros tipos de mangos están hechos de metal? ¿Qué tipo de material debe elegirse para los elementos que se calientan en las tostadoras? ¿Por qué el aluminio se siente más frío al tacto que el plástico cuando los dos están a temperatura ambiente? ¿Por qué los componentes metálicos están siendo sustituidos por cerámicos en algunas máquinas? ¿Por qué los fuselajes de los aviones comerciales solían fabricarse con aluminio y por qué ahora algunos están siendo reemplazados gradualmente por diversos materiales compósitos, incluyendo los plásticos reforzados?

A partir de estas preguntas, resulta evidente que un criterio importante en la selección del material es la consideración de sus **propiedades físicas**, como la densidad, el punto de fusión, el calor específico, la conductividad térmica, la dilatación térmica, las propiedades eléctricas y magnéticas y la resistencia a la oxidación y la corrosión. Las combinaciones de las propiedades mecánicas y físicas, por ejemplo las relaciones de resistencia a peso y rigidez a peso de los materiales son igualmente importantes; en particular para los aviones y las estructuras aeroespaciales. Además, los equipos de alta velocidad, como la maquinaria textil y de impresión, y las máquinas de formado y corte para operaciones de alta velocidad, requieren componentes ligeros para reducir las fuerzas de inercia y, por lo tanto, para evitar que las máquinas estén sometidas a una vibración excesiva. En este capítulo se describen algunos otros ejemplos de la importancia de las propiedades físicas.

3.2 Densidad

La **densidad** de un material es su masa por unidad de volumen. Otro término es la **gravedad específica**, que expresa la densidad relativa de un material con respecto a la del agua; por lo tanto, la gravedad específica no tiene unidades. En las tablas 3.1 y 3.2 se proporciona el rango de densidades para diferentes materiales a temperatura ambiente, junto con otras propiedades.

La reducción de peso es particularmente importante para las estructuras aeronáuticas y aeroespaciales, las carrocerías y los componentes automotrices y para otros diversos

TABLA 3.1

Propiedades físicas a temperatura ambiente de los materiales seleccionados						
Material	Densidad (kg/m ³)	Punto de fusión (°C)	Calor específico (J/kg-K)	Conductividad térmica (W/m-K)	Coefficiente de dilatación térmica (μm/m-°C)	Resistividad eléctrica (Ω-m)
Metálico						
Aluminio	2700	660	900	222	23.6	2.8 × 10 ⁻⁸
Aleaciones de aluminio	2630-2820	476-654	880-920	121-239	23.0-23.6	2.8-4.0 × 10 ⁻⁸
Berilio	1854	1278	1884	146	8.5	4.0 × 10 ⁻⁸
Niobio (columbio)	8580	2468	272	52	7.1	15 × 10 ⁻⁸
Cobre	8970	1082	385	393	16.5	1.7 × 10 ⁻⁸
Aleaciones de cobre	7470-8940	885-1260	377-435	219-234	16.5-20	1.7-5.9 × 10 ⁻⁸
Oro	19 300	1063	129	317	19.3	2.4 × 10 ⁻⁸
Hierro	7860	1537	460	74	11.5	9.5 × 10 ⁻⁸
Plomo	11 350	327	130	35	29.4	20.6 × 10 ⁻⁸
Aleaciones de plomo	8850-11 350	182-326	126-188	24-46	27.1-31.1	20.6-24 × 10 ⁻⁸
Magnesio	1745	650	1025	154	26.0	4.5 × 10 ⁻⁸
Aleaciones de magnesio	1770	610-621	1046	75-138	26.0	4.5-15.9 × 10 ⁻⁸
Aleaciones de molibdeno	10 210	2610	276	142	5.1	5.3 × 10 ⁻⁸
Níquel	8910	1453	440	92	13.3	6.2 × 10 ⁻⁸
Aleaciones de níquel	7750-8850	1110-1454	381-544	12-63	12.7-18.4	6.2-110 × 10 ⁻⁸
Platino	2145	1768	133	71.6	8.8	10.5 × 10 ⁻⁸
Silicio	2330	1423	712	148	7.63	1.0 × 10 ⁻³
Plata	10 500	961	235	429	19.3	1.6 × 10 ⁻⁸
Aceros	6920-9130	1371-1532	448-502	15-52	11.7-17.3	17.0 × 10 ⁻⁸
Aleaciones de tantalio	16 600	2996	142	54	6.5	13.5 × 10 ⁻⁸
Estaño	7310	232	217	67	22	11.5 × 10 ⁻⁸
Titanio	4510	1668	519	17	8.35	42 × 10 ⁻⁸
Aleaciones de titanio	4430-4700	1549-1649	502-544	8-12	8.1-9.5	40-171 × 10 ⁻⁸
Tungsteno	19 290	3410	138	166	4.5	5.0 × 10 ⁻⁸
Zinc	7140	419	385	113	32.5	5.45 × 10 ⁻⁸
Aleaciones de zinc	6640-7200	386-525	402	105-113	32.5-35	6.06-6.89 × 10 ⁻⁸
No metálico						
Cerámicos	2300-5500	—	750-950	10-17	5.5-13.5	—
Vidrios	2400-2700	580-1540	500-850	0.6-1.7	4.6-70	—
Grafito	1900-2200	—	840	5-10	7.86	—
Plásticos	900-2000	110-330	1000-2000	0.1-0.4	72-200	—
Madera	400-700	—	2400-2800	0.1-0.4	2-60	—

TABLA 3.2

Propiedades físicas de los materiales (en orden descendente)					
Densidad	Punto de fusión	Calor específico	Conductividad térmica	Dilatación térmica	Conductividad eléctrica
Platino	Tungsteno	Madera	Plata	Plásticos	Plata
Oro	Tantalio	Berilio	Cobre	Plomo	Cobre
Tungsteno	Molibdeno	Porcelana	Oro	Estaño	Oro
Tantalio	Niobio	Aluminio	Aluminio	Magnesio	Aluminio
Plomo	Titanio	Grafito	Magnesio	Aluminio	Magnesio
Plata	Hierro	Vidrio	Grafito	Cobre	Tungsteno
Molibdeno	Berilio	Titanio	Tungsteno	Acero	Berilio
Cobre	Cobre	Hierro	Berilio	Oro	Acero
Acero	Oro	Cobre	Zinc	Cerámicos	Estaño
Titanio	Plata	Molibdeno	Acero	Vidrio	Grafito
Aluminio	Aluminio	Tungsteno	Tantalio	Tungsteno	Cerámicos
Berilio	Magnesio	Plomo	Cerámicos		Vidrio
Vidrio	Plomo		Titanio		Plásticos
Magnesio	Estaño		Vidrio		Cuarzo
Plásticos	Plásticos		Plásticos		

productos en los que el consumo de energía y las limitaciones de potencia son las preocupaciones principales. La sustitución de materiales para reducir el peso y por economía es un factor importante en el diseño de equipos avanzados, maquinaria y productos de consumo tales como automóviles, aviones, artículos deportivos, computadoras portátiles y bicicletas.

Un papel importante que desempeña la densidad está en la **relación de resistencia a peso (resistencia específica)** y en la **relación de rigidez a peso (rigidez específica)** de los materiales. En la figura 3.1 se muestra la relación del esfuerzo de cedencia o fluencia

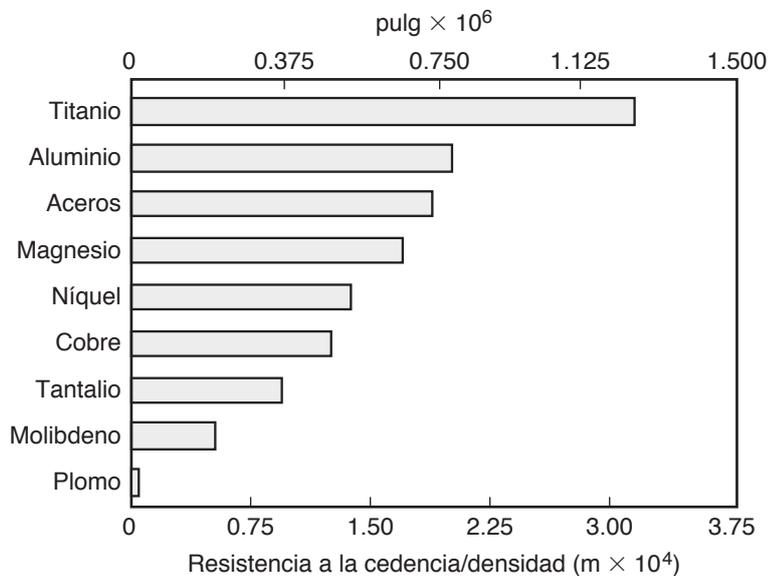


FIGURA 3.1 Relación del esfuerzo de cedencia máximo sobre la densidad para las aleaciones metálicas seleccionadas.

máximo sobre la densidad para diversas aleaciones metálicas. Observe que el titanio y el aluminio están en la parte superior de la lista y, en consecuencia, tal como se describe en el capítulo 6, se encuentran entre los metales más utilizados para diversas aplicaciones.

En la figura 3.2 se proporcionan la resistencia a la tensión específica y la rigidez específica a temperatura ambiente para diversos materiales metálicos y no metálicos. En relación con estas propiedades, note las posiciones de los materiales compósitos en comparación con las de los metales; estas ventajas han hecho que los materiales compósitos estén entre los más importantes, como se describe en el capítulo 9. A temperaturas elevadas, la resistencia específica y la rigidez específica son consideraciones igualmente importantes, especialmente para los componentes que funcionan a dichas temperaturas; por ejemplo, motores de automóvil y avión, turbinas de gas y hornos. En la figura 3.3 aparecen los rangos típicos para diferentes materiales como una función de la temperatura.

La densidad también es un factor importante en la selección de materiales para dispositivos de alta velocidad, como el magnesio en la maquinaria textil y de impresión, en los que muchos componentes suelen operar a velocidades muy altas. Para obtener los tiempos de exposición de 1/4000 s en las cámaras fotográficas sin sacrificar la precisión, los obturadores de plano focal de algunas cámaras digitales de alta calidad están hechos de titanio. En otras cámaras digitales se utiliza el aluminio para obtener un mejor rendimiento en climas fríos. Debido a su baja densidad, los materiales cerámicos (capítulo 8) se utilizan ahora en componentes de maquinaria automatizada y máquinas herramientas de alta velocidad.

Por otra parte, existen aplicaciones en las que el peso es deseable. Ejemplos de esto son los contrapesos para diversos mecanismos (donde se emplea plomo o acero), volantes, contrapesos en yates y aviones y las cabezas de los palos de golf (donde se usan materiales de alta densidad como el tungsteno).

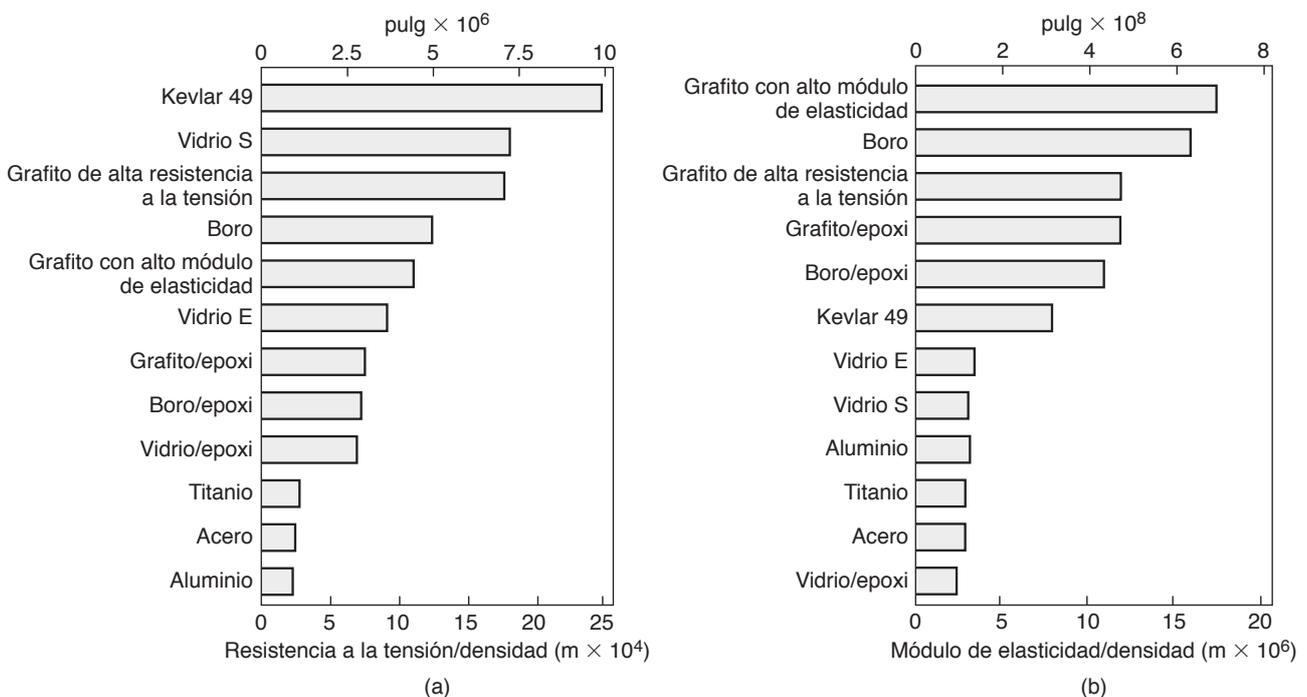


FIGURA 3.2 Resistencia específica (resistencia a la tensión/densidad) y rigidez específica (módulo de elasticidad/densidad) para diversos materiales a temperatura ambiente. (Vea también el capítulo 9).

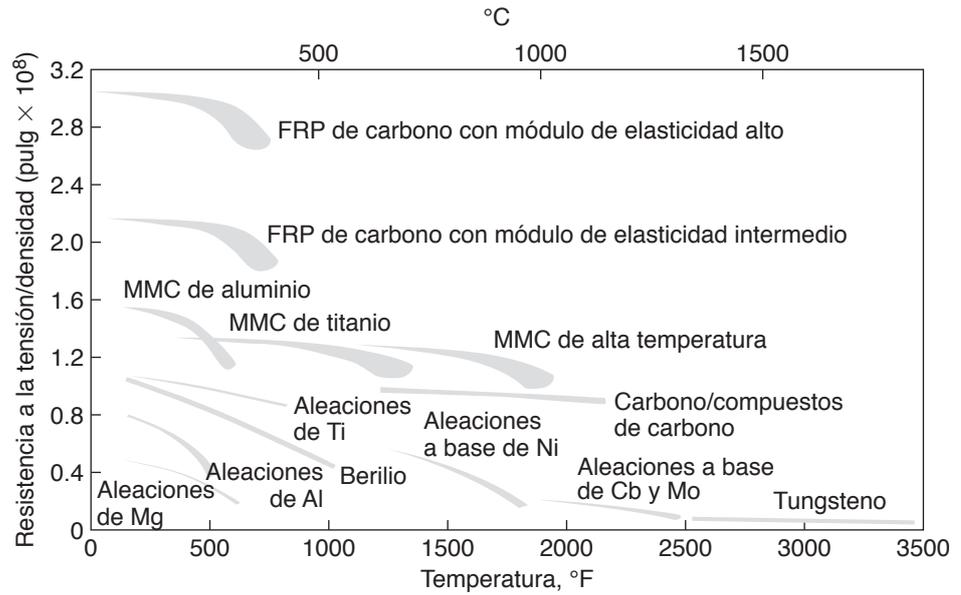


FIGURA 3.3 Resistencia específica (resistencia a la tensión/densidad) para una variedad de materiales en función de la temperatura; observe el rango de temperatura útil para estos materiales y los valores altos para los materiales compósitos. MMC = compuesto de matriz metálica; FRP = plástico reforzado con fibra.

3.3 Punto de fusión

Una consideración importante en la selección de materiales es el rango de temperatura dentro del cual funcionará un componente o una estructura de acuerdo con su diseño. Por ejemplo, los plásticos tienen el rango útil de temperatura más bajo, mientras que las aleaciones de grafito y de metal refractario tienen el rango útil más alto. Observemos también que los metales puros tienen un punto de fusión definido, mientras que la temperatura de fusión de una aleación metálica puede poseer un rango amplio (tabla 3.1) según su composición.

El punto de fusión tiene cierto número de efectos indirectos sobre las operaciones de manufactura. Debido a que la temperatura de recristalización de un metal está relacionada con su punto de fusión (sección 1.7), operaciones como el recocido y el tratamiento térmico (capítulo 4) y el trabajo en caliente (parte III) requieren del conocimiento de los puntos de fusión de los materiales involucrados. Estas consideraciones también son importantes en la selección de los materiales para herramientas y dados o matrices. Asimismo, el punto de fusión juega un papel importante en la selección del equipo y en la práctica de fusión de materiales empleada en las operaciones del proceso de fundición de metales (parte II) y en el proceso de maquinado por electroerosión (o descarga eléctrica) (sección 27.5), donde los puntos de fusión de los metales se relacionan con la velocidad de remoción del material y de desgaste de los electrodos.

3.4 Calor específico

El calor específico de un material es la energía necesaria para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa. La aleación de elementos tiene un efecto relativamente menor en el calor específico de los metales. El aumento de la temperatura en una pieza de trabajo, como el que se deriva de las operaciones de conformado o mecanizado (partes III y IV, respectivamente), es una función del trabajo realizado y del calor específico del material de trabajo (sección 2.12). Un calentamiento excesivo en una pieza de trabajo puede:

- a. Reducir la calidad del producto al afectar negativamente su acabado superficial y su precisión dimensional.
- b. Causar desgaste excesivo en herramientas y dados.
- c. Ocasionar cambios metalúrgicos indeseables en el material.

3.5 Conductividad térmica

La **conductividad térmica** indica la velocidad a la que fluye el calor dentro y a través de un material. Los materiales con enlace metálico (metales) suelen tener una alta conductividad térmica, mientras que los materiales con enlaces iónicos o covalentes (cerámicos y plásticos) tienen baja conductividad (tabla 3.2). Los elementos de aleación pueden tener un efecto significativo en la conductividad térmica de las aleaciones, como se puede ver al comparar los metales puros contra sus aleaciones en la tabla 3.1. En general, los materiales con alta conductividad eléctrica también tienen una alta conductividad térmica.

La conductividad térmica es una consideración importante en muchas aplicaciones. Por ejemplo, se desea una alta conductividad térmica en las aletas de enfriamiento, las herramientas de corte y los moldes de fundición en dados para extraer más rápidamente el calor. Por el contrario, los materiales con baja conductividad térmica son los más usados en el revestimiento interior de hornos, en aislamientos, tazas para café y asas y mangos de ollas y sartenes. Una función de un lubricante en el trabajo en caliente con metales es la de servir como aislante para mantener a la pieza de trabajo caliente y, por lo tanto, formable.

3.6 Dilatación térmica

La **dilatación térmica** de los materiales puede tener varios efectos significativos, en particular la dilatación o contracción relativa de los diferentes materiales que integran un ensamble como, digamos, los componentes electrónicos y computacionales, sellos de vidrio a metal, puntales en los motores a reacción, recubrimientos de las herramientas de corte (sección 22.5) y piezas de maquinaria que requieren ciertas holguras para funcionar adecuadamente. El uso de componentes cerámicos en los motores de hierro fundido, por ejemplo, también requiere tomar en cuenta su dilatación relativa durante la operación. Los *ajustes por contracción* utilizan la dilatación y contracción térmicas; un ajuste por contracción es una pieza, con frecuencia un buje o una brida, que debe instalarse sobre una flecha. La pieza se calienta primero y después se desliza sobre la flecha o husillo; cuando se deja enfriar, el buje se reduce y el ensamble se convierte en un componente integral.

En la tabla 3.1 se proporcionan los coeficientes típicos de dilatación térmica (vea también efecto *Invar* un poco más adelante). En general, el coeficiente de dilatación térmica es inversamente proporcional al punto de fusión del material. La aleación de elementos tiene un efecto relativamente menor en la dilatación térmica de los metales.

La dilatación térmica, junto con la conductividad térmica, desempeña el papel más significativo en el desarrollo de **esfuerzos térmicos** (debido a los *gradientes de temperatura*) tanto en componentes manufacturados como en herramientas y dados y en los moldes para operaciones de fundición. Esta consideración es especialmente importante, por ejemplo, en una operación de forjado durante la cual se colocan en forma repetida piezas de trabajo calientes sobre un dado relativamente frío, sometiendo así a las superficies del dado a un ciclo térmico. Para reducir los esfuerzos térmicos, se recomienda una combinación de alta conductividad térmica y baja dilatación térmica. Los esfuerzos térmicos también pueden ser causados por **anisotropía de la dilatación térmica**, es decir, el material se expande de manera diferente en las distintas direcciones. Esta propiedad se observa generalmente en metales de estructura hexagonal compacta, cerámicos y materiales compósitos.

La dilatación y la contracción térmicas pueden conducir al agrietamiento, el alabeo o a que los componentes se aflojen durante su vida de servicio, así como al fisurado de las

piezas cerámicas y de las herramientas y dados fabricados con materiales relativamente frágiles. La **fatiga térmica** es resultado de ciclos térmicos y provoca una serie de grietas en la superficie, sobre todo en las herramientas y dados para operaciones de fundición y trabajo con metales (*agrietamiento por calor*). **Choque térmico** es el término general utilizado para describir el desarrollo de una o varias grietas después de la aplicación de un solo ciclo térmico.

Para mitigar algunos de los problemas causados por la dilatación térmica, existe una familia de aleaciones de hierro y níquel cuyos coeficientes de dilatación térmica son muy bajos, las denominadas **aleaciones de baja dilatación**. A la baja dilatación térmica característica de estas aleaciones se le refiere a menudo como **efecto Invar**, llamado así por el metal *Invar*. Su coeficiente de dilatación térmica suele estar en el rango de 2×10^{-6} a 9×10^{-6} por $^{\circ}\text{C}$ (compárelo con los coeficientes dados en la tabla 3.1). Las composiciones típicas son de 64% Fe y 36% Ni para el Invar y de 54% Fe, 28% Ni y 18% Co para el Kovar.

Las aleaciones de baja dilatación también tienen una buena resistencia a la fatiga térmica y, debido a su buena ductilidad, pueden formarse fácilmente de varias maneras. Las aplicaciones incluyen (a) tiras bimetálicas, que constan de una aleación de baja dilatación enlazada metalúrgicamente a una aleación de alta dilatación (la tira se dobla al verse sometida a variaciones de temperatura), y (b) sellos de vidrio a metal, donde se hacen coincidir las dilataciones térmicas de los dos materiales.

3.7 Propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas

La *conductividad eléctrica* y las propiedades *dieléctricas* de los materiales son importantes no sólo en el equipo eléctrico y la maquinaria, sino también en procesos de manufactura tales como el formado por pulso magnético (sección 16.12), la soldadura por resistencia (sección 31.5) y el maquinado por descarga eléctrica (o electroerosión) y el esmerilado electroquímico de materiales duros y frágiles (capítulo 27). Las unidades de conductividad eléctrica son mho/m o mho/pie, donde mho es el inverso de ohm, la unidad de resistencia eléctrica. La aleación de elementos tiene un efecto importante en la conductividad eléctrica de los metales; cuanto mayor sea la conductividad del elemento aleado, mayor será la conductividad eléctrica de la aleación.

Resistencia dieléctrica. La *resistencia dieléctrica* de un material eléctricamente aislante es el campo eléctrico más grande al que puede someterse sin degradar o perder sus propiedades aislantes. Esta propiedad se define como el voltaje requerido por unidad de distancia para llegar a la ruptura eléctrica y tiene las unidades de V/m o V/pie.

Conductores. Los materiales con alta conductividad eléctrica, como los metales, se conocen en general como *conductores*. La **resistividad eléctrica** es el inverso de la conductividad eléctrica; los materiales con alta resistividad eléctrica se conocen como **dieléctricos** o **aislantes**.

Superconductores. La *superconductividad* es el fenómeno de resistividad eléctrica cercana a cero que se produce en algunos metales y aleaciones por debajo de una temperatura crítica, a menudo cercana al cero absoluto (0 K, -273°C o -460°F). La temperatura más alta a la que hasta la fecha se ha exhibido superconductividad es para un compuesto de mercurio, bario, calcio y cobre ($\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) bajo presión, dicha temperatura puede llegar a ser tan alta como -109°C (-164°F); en la actualidad, se siguen teniendo avances en la superconductividad a altas temperaturas.

La principal aplicación de los superconductores es en imanes de alta potencia, siendo la tecnología que permite la resonancia magnética utilizada para obtener imágenes médicas. Otras aplicaciones propuestas para los superconductores son trenes de levitación

magnética (maglev), líneas eficientes de transmisión eléctrica y componentes para computadoras extremadamente rápidas.

Semiconductores. Las propiedades eléctricas de los materiales *semiconductores*, como el silicio monocristalino, germanio y arseniuro de galio, son extremadamente sensibles a la temperatura y a la presencia y el tipo de pequeñas impurezas. Por lo tanto, al controlar la concentración y el tipo de impurezas (llamadas **dopantes**), como fósforo y boro en el silicio, es posible controlar la conductividad eléctrica. Esta propiedad se utiliza en los dispositivos semiconductores (de estado sólido) que se emplean de manera amplia en los circuitos electrónicos miniaturizados.

Ferromagnetismo y ferrimagnetismo. El *ferromagnetismo* es un fenómeno que se caracteriza por alta permeabilidad y magnetización permanente debidas a la alineación de los átomos de hierro, níquel y cobalto. Es importante en aplicaciones tales como los motores eléctricos, generadores eléctricos, transformadores eléctricos y dispositivos de microondas. El *ferrimagnetismo* consiste en una gran magnetización permanente exhibida por algunos materiales cerámicos, como las ferritas cúbicas.

Efecto piezoeléctrico. El *efecto piezoeléctrico* (del griego piezo que significa “a presión”) es exhibido por los denominados **materiales inteligentes**. Esto implica dos comportamientos básicos: (a) cuando se someten a una corriente eléctrica, estos materiales experimentan un cambio reversible en su forma, hasta de 4%, y (b) cuando se deforman debido a una fuerza externa, los materiales emiten una pequeña corriente eléctrica. Entre los materiales piezoeléctricos están los cristales de cuarzo y algunos cerámicos y polímeros. El efecto piezoeléctrico se utiliza en la fabricación de transductores, los cuales son dispositivos que convierten la deformación debida a una fuerza externa en energía. Las aplicaciones típicas son los sensores eléctricos, transductores de fuerza o a presión, impresoras de inyección de tinta, galgas extensiométricas, detectores de sonar y micrófonos. Como ejemplo, una bolsa de aire instalada en un automóvil tiene un sensor que, cuando se somete a una fuerza de impacto, envía una carga eléctrica que despliega la bolsa.

Magnetostricción. El fenómeno de la dilatación o contracción de un material cuando se somete a un campo magnético se denomina *magnetostricción*. Materiales como el níquel puro y algunas aleaciones de hierro y níquel presentan este comportamiento. La magnetostricción es el principio que está detrás de los equipos de maquinado ultrasónico (sección 26.6).

Efectos magnetoreostático y electroreostático. Cuando algunos fluidos se someten a campos magnéticos o eléctricos, experimentan un cambio importante y reversible en su viscosidad durante una fracción de segundo cambiando del estado líquido a un estado casi sólido. Por ejemplo, el comportamiento magnetoreostático se alcanza mediante la mezcla de limaduras de hierro muy finas con aceite. Estos materiales, llamados **fluidos inteligentes**, se están desarrollando para aplicaciones como amortiguadores de vibración, soportes de motor, dispositivos protésicos, embragues y válvulas.

Propiedades ópticas. Entre otras propiedades, el color y la opacidad son particularmente relevantes para los polímeros y vidrios. Estas dos propiedades se describen en las secciones 7.2.2 y 8.4.3, respectivamente.

3.8 Resistencia a la corrosión

Metales, cerámicos y plásticos están sujetos a formas de **corrosión**. En sí, la palabra corrosión se refiere generalmente al deterioro de los metales y cerámicos, mientras que el fenómeno semejante en los plásticos (capítulo 7) suele denominarse **degradación**. La corrosión no sólo conduce al deterioro superficial de componentes y estructuras, como puentes y barcos, sino que también reduce su resistencia e integridad estructural. El costo directo de la corrosión para la economía de Estados Unidos se ha estimado, por

sí solo, en más de \$400 mil millones de dólares al año, aproximadamente el 3% del producto interno bruto. Los costos indirectos de la corrosión se estiman en el doble de esa cantidad.

La *resistencia a la corrosión* es un aspecto importante de la selección del material para aplicaciones en las industrias petroquímica y alimentaria, así como en las operaciones de manufactura. Además de las diversas reacciones químicas posibles de los elementos y compuestos presentes, la oxidación y la corrosión del medio ambiente hacia los componentes y estructuras es una preocupación importante, particularmente a temperaturas elevadas y en los automóviles y otros vehículos de transporte.

La resistencia a la corrosión depende de la composición del material y del medio ambiente en particular. Los medios corrosivos pueden ser productos químicos (ácidos, álcalis y sales) o el medio ambiente (oxígeno, humedad, contaminación y lluvia ácida), incluyendo el agua (dulce o salada). Por lo general, metales no ferrosos, aceros inoxidable y materiales no metálicos tienen alta resistencia a la corrosión, mientras que los aceros y hierros fundidos suelen tener poca resistencia y deben ser protegidos mediante diversos recubrimientos y tratamientos superficiales (capítulo 34).

La corrosión puede ocurrir sobre toda una superficie o puede estar *localizada*, lo cual se conoce como **picadura**, un término que se utiliza también para el desgaste por fatiga o la falla de los engranes y en el forjado; vea la sección 33.2. La corrosión también puede ocurrir a lo largo de los límites de grano de los metales, como una corrosión intergranular, y en la interfase de las uniones atornilladas o remachadas, en la forma de una **corrosión por cavidades**.

Es posible formar una **celda galvánica** (nombre dado en honor al médico italiano L. Galvani, 1737-1798) a partir de dos metales diferentes; es decir, ubicar dos electrodos dentro de un electrolito en un ambiente corrosivo que incluya humedad y provocar la **corrosión galvánica**. Las aleaciones de dos fases (capítulo 4) son más susceptibles a la corrosión galvánica (debido a la separación física de los dos diferentes metales involucrados) que las aleaciones monofásicas o los metales puros y, en consecuencia, el tratamiento térmico puede tener una influencia benéfica significativa en la resistencia a la corrosión.

El **agrietamiento por corrosión por esfuerzo** (sección 2.10.2) es un ejemplo del efecto de un ambiente corrosivo en la integridad de un producto que, tal como se fabricó, posea esfuerzos residuales. De igual modo, es probable que los metales trabajados en frío tengan esfuerzos residuales, por lo que son más susceptibles a la corrosión que los metales trabajados en caliente o recocidos.

Los materiales para herramientas y los dados o matrices también pueden ser susceptibles al ataque químico de lubricantes y refrigerantes; la reacción química altera su acabado superficial e influye negativamente en las operaciones de trabajo con metales. Un ejemplo es el de las herramientas de carburo y los dados (matrices) que tienen al cobalto como aglutinante (sección 22.4); el cobalto es atacado por los elementos presentes en el fluido para cortar metales (**lixiviación selectiva**). Por lo tanto, una consideración importante en la selección de materiales es la compatibilidad de los materiales de la herramienta, el dado y la pieza con el fluido de trabajo con metales bajo condiciones reales de funcionamiento.

Sin embargo, no debe considerarse que las reacciones químicas sólo tienen efectos adversos. De hecho, algunos procesos avanzados como los de maquinado químico y electroquímico (capítulo 27) se basan en reacciones químicas controladas. Estos procesos eliminan material por acción química, de una manera similar a la del ataque en las probetas metalográficas.

El beneficio obtenido al contar con cierto nivel de **oxidación** se demuestra mediante la resistencia a la corrosión del aluminio, el titanio y el acero inoxidable (sección 33.2). El aluminio desarrolla una película dura de óxido adherente (Al_2O_3), que es delgada (unas pocas capas atómicas), resistente y protege mejor la superficie de una corrosión ambiental adicional. El titanio desarrolla una película de óxido de titanio (TiO_2). Un fenómeno similar se produce en los aceros inoxidables que, debido al cromo presente en la aleación, desarrollan una película protectora de óxido de cromo en sus superficies. Estos procesos se conocen como **pasivación**. Cuando la película protectora se raspa y la parte subyacente del metal queda expuesta, comienza a formarse una nueva película de óxido.

CASO DE ESTUDIO 3.1 Selección de materiales para acuñar monedas

En la selección de materiales para acuñar monedas (figura 3.4), existen seis criterios generales.

1. *Factores subjetivos*, como la *apariciencia* de la moneda, su color, peso y resonancia (el sonido que produce al ser golpeada). En este criterio también se incluye la *sensación* que produce la moneda, un término que en el efecto es parecido a la sensación procedente de tocar una pieza de madera fina, una piedra pulida o una vajilla. Es difícil de cuantificar puesto que combina varios factores humanos.
2. La *vida* esperada de la moneda también es un factor a tomar en cuenta; esta duración reflejará la resistencia a la corrosión y al desgaste (capítulo 33) mientras la moneda esté en circulación. Estos dos factores determinan básicamente el lapso durante el cual la superficie impresa de la moneda seguirá siendo identificable, así como la capacidad de la moneda para retener su brillo original.
3. La *manufactura* de la moneda incluye factores como la formabilidad de los materiales candidatos a convertirse en monedas, la vida de los troqueles utilizados en la operación de acuñado (sección 14.4) y la capacidad de los materiales y procesos para resistir la falsificación.
4. Otra consideración es *qué tan adecuado resulta su uso* en dispositivos que funcionan con monedas, como las máquinas expendedoras y los torniquetes. Estas máquinas están generalmente equipadas con dispositivos de detección que prueban las monedas; primero, en cuanto a su diámetro, espesor y condición superficial adecuados; y segundo, con respecto a su conductividad



FIGURA 3.4 Selección de monedas estadounidenses fabricadas a partir de diferentes aleaciones metálicas de cobre, níquel, estaño, zinc y aluminio. Metales valiosos como el oro y la plata se utilizan también para acuñar monedas, pero éstas no circulan comúnmente.

eléctrica y densidad. Si la moneda falla en cualquiera de estas pruebas, es rechazada.

5. Los aspectos de *salud* también deben ser considerados. Por ejemplo, dada la gran proporción de población con alergia al níquel, las monedas en euros se acuñan con aleaciones sin níquel.
6. Una última consideración es el costo de las materias primas y de su procesamiento, además de una *oferta* suficiente de los materiales para elaborar las monedas. Por ejemplo, Canadá ha decidido recientemente que eliminará la moneda de un centavo debido a su alto costo de producción y a su limitado valor monetario. Estados Unidos tiene preocupaciones similares porque la fabricación de un centavo (penny) cuesta alrededor de 1.6 centavos de dólar.

RESUMEN

- Las propiedades físicas pueden influir de varias e importantes maneras en la selección de materiales, la manufactura y la vida útil de los componentes. Estas propiedades y otras características pertinentes de los materiales deben ser consideradas debido a sus posibles efectos en el diseño de los productos, a sus requerimientos de servicio y a la compatibilidad con otros materiales, como los usados en herramientas, dados y piezas de trabajo.
- Las propiedades combinadas de las relaciones de resistencia a peso y rigidez a peso son factores importantes en la selección de materiales para las estructuras ligeras o de bajo peso y alto rendimiento.
- La conductividad térmica y la dilatación térmica son factores importantes en la generación de esfuerzos, la fatiga y el choque térmicos, efectos que son importantes en la vida de las herramientas y dados usados en las operaciones de manufactura.
- Las reacciones químicas, incluyendo la oxidación y corrosión, son factores importantes en la selección, el diseño y la manufactura de materiales, así como en la vida útil de los

componentes. La pasivación y el agrietamiento por corrosión por esfuerzo son otros dos fenómenos que deben ser tomados en cuenta.

- Existen ciertas propiedades físicas que se utilizan en los procesos de manufactura y su control, como el efecto de magnetostricción (para el maquinado ultrasónico de materiales) y el efecto piezoeléctrico (para los transductores de fuerza y varios sensores).

TÉRMINOS CLAVE

Agrietamiento por calor	Corrosión galvánica	Esfuerzos térmicos	Oxidación
Agrietamiento por corrosión por esfuerzo	Degradación	Fatiga térmica	Pasivación
Calor específico	Densidad	Ferromagnetismo	Punto de fusión
Conductividad eléctrica	Dieléctrico	Fluidos inteligentes	Resistencia específica
Conductividad térmica	Dilatación térmica	Lixiviación selectiva	Resistividad eléctrica
Conductores	Efecto Invar	Magnetoreostática	Rigidez específica
Corrosión	Efecto piezoeléctrico	Magnetostricción	Semiconductores
	Electroreostática	Materiales inteligentes	Superconductividad

BIBLIOGRAFÍA

- ASM *Handbook*, Vol. 13A: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, 2003; Vol. 13B: Corrosion: Materials, 2005; Vol. 13C: Corrosion: Environments and Industries, 2006, ASM International.
- Hummel, R. E., *Electronic Properties of Materials*, 4a. ed., Springer, 2011.
- Pollock, D. D., *Physical Properties of Materials for Engineers*, 2a. ed., CRC Press, 1993.
- Schweitzer, P. A., *Encyclopedia of Corrosion Technology*, 3a. ed., Marcel Dekker, 2004.
- Solymar, L., y Walsh, D., *Electrical Properties of Materials*, Oxford, 2004.
- White, M. A., *Physical Properties of Materials*, 2a. ed., CRC Press, 2011.

PREGUNTAS DE REPASO

- 3.1** Liste diversas razones por las que la densidad es una propiedad importante del material.
- 3.2** Explique por qué el punto de fusión de un material puede ser un factor importante en la selección del mismo.
- 3.3** ¿Qué efectos adversos pueden ser causados por la dilatación térmica de los materiales? Proporcione algunos ejemplos.
- 3.4** ¿El agrietamiento térmico es lo mismo que el choque térmico? ¿Por qué sí o por qué no?
- 3.5** ¿Qué es el efecto piezoeléctrico?
- 3.6** Describa los factores que pueden conducir a la corrosión de un metal.
- 3.7** ¿Qué es un superconductor? Describa dos aplicaciones de los materiales superconductores.
- 3.8** ¿Cuál es la diferencia entre conductividad térmica y dilatación térmica?
- 3.9** ¿Qué es la corrosión? ¿Cómo puede evitarse o acelerarse?
- 3.10** Explique el agrietamiento por corrosión por esfuerzo. ¿Por qué también se denomina agrietamiento estacional?
- 3.11** ¿Cuál es la diferencia entre un superconductor y un semiconductor?
- 3.12** ¿Qué son los materiales inteligentes?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 3.13** ¿Cuál es la diferencia fundamental entre las propiedades mecánicas de los materiales analizadas en el capítulo 2 y las propiedades físicas de los materiales descritas en este capítulo?
- 3.14** Describa la importancia de las estructuras y los componentes de máquina hechos a partir de dos materiales con diferentes coeficientes de dilatación térmica.

3.15 ¿Cuáles de las propiedades descritas en este capítulo son importantes para (a) ollas y sartenes, (b) bandejas para hornear galletas, (c) reglas, (d) clips para papel, (e) cuerdas para instrumentos musicales y (f) latas para bebidas. Explique sus respuestas.

3.16 Observe en la tabla 3.1 que existe un amplio rango de propiedades en las aleaciones metálicas en comparación con las que existen para los metales puros. Explique por qué.

3.17 Clasifique los siguientes materiales en orden creciente de conductividad térmica: aluminio, cobre, silicio, titanio, cerámicos y plásticos. Comente la forma en que esta clasificación influye en las aplicaciones de dichos materiales.

3.18 ¿La corrosión tiene algunos efectos benéficos? Explique su respuesta.

3.19 Explique la forma en que la conductividad térmica puede desempeñar un papel en la formación de esfuerzos residuales en los metales.

3.20 ¿Qué propiedades de los materiales son deseables para los recubrimientos contra el calor como los que se colocan en los transbordadores espaciales?

3.21 Liste ejemplos de productos en los que se desean materiales transparentes. También liste aplicaciones para materiales opacos.

3.22 Con referencia a la figura 3.2, explique por qué las tendencias observadas son las que se esperaban.

3.23 Dos propiedades físicas que tienen gran influencia en el agrietamiento de piezas, herramientas, dados o matrices durante los ciclos térmicos son la conductividad térmica y la dilatación térmica. Explique por qué.

3.24 ¿Cuál de los materiales descritos en este capítulo tiene la más alta (o el más alto) (a) densidad, (b) conductividad eléctrica, (c) conductividad térmica, (d) calor específico, (e) punto de fusión y (f) costo.

3.25 ¿Cuáles propiedades descritas en este capítulo pueden verse afectadas por la aplicación de un recubrimiento?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

3.26 Si se supone que todo el trabajo realizado en la deformación plástica se convierte en calor, el aumento de temperatura en una pieza de trabajo es (1) directamente proporcional al trabajo realizado por unidad de volumen y (2) inversamente proporcional al producto del calor específico por la densidad de la pieza de trabajo. Use la figura 2.5 y, considerando que las áreas bajo las curvas representan el trabajo unitario realizado, calcule el aumento de temperatura para (a) el acero 8650, (b) acero inoxidable 304 y (c) aluminio 1100-H14.

3.27 La frecuencia natural, f , de una viga en voladizo está dada por

$$f = 0.56 \sqrt{\frac{EIg}{wL^4}},$$

donde E es el módulo de elasticidad, I es el momento de inercia, g es la constante gravitacional, w es el peso de la viga por unidad de longitud y L es la longitud de la viga. ¿Cómo cambia

la frecuencia natural de la viga, en caso de hacerlo, a medida que aumenta su temperatura? Suponga que el material es acero.

3.28 Grafique lo siguiente para los materiales descritos en este capítulo: módulo de elasticidad contra densidad, esfuerzo de cedencia contra densidad, conductividad térmica contra densidad. Comente sobre las implicaciones de estas gráficas.

3.29 Es posible demostrar que la distorsión térmica en dispositivos de precisión es baja para valores altos de conductividad térmica dividida entre el coeficiente de dilatación térmica. Ordene los materiales incluidos en la tabla 3.1 según su capacidad para resistir distorsión térmica.

3.30 Agregue una columna a la tabla 3.1 que indique la capacidad calorífica volumétrica de los materiales descritos expresada en unidades de $\text{J/cm}^3\text{-K}$. Compare los resultados con el valor dado para el agua líquida ($4.184 \text{ J/cm}^3\text{-K}$). Note que la capacidad calorífica volumétrica de un material es el producto de su densidad por su calor específico.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

3.31 Realice una búsqueda bibliográfica y agregue los siguientes materiales a la tabla 3.1: corcho, cemento, hielo, azúcar, litio, grafeno y cromo.

3.32 Con base en su propia experiencia, haga una lista de piezas, componentes o productos que se hayan corroído y hayan tenido que reemplazarse o desecharse.

3.33 Haga una lista de aplicaciones donde las propiedades siguientes sean deseables: (a) alta densidad, (b) baja densidad, (c) alto punto de fusión, (d) bajo punto de fusión, (e) alta conductividad térmica y (f) baja conductividad térmica.

3.34 Describa diversas aplicaciones en las que tanto la resistencia específica como la rigidez específica sean importantes.

3.35 Diseñe varios mecanismos o instrumentos basados en el uso de las diferencias de dilatación térmica entre los materiales,

como las tiras bimetálicas que desarrollan una curvatura cuando se les calienta.

3.36 Para los materiales mencionados en la tabla 3.1, determine la resistencia específica y la rigidez específica. Describa sus observaciones.

3.37 La fuerza de compresión máxima que puede soportar una columna de bajo peso o ligera antes de pandearse depende de la relación que haya entre la raíz cuadrada de la rigidez sobre la densidad del material. Para los materiales descritos en la tabla 2.2, determine (a) la relación de la resistencia a la tensión sobre la densidad y (b) la relación del módulo de elasticidad sobre la densidad. Comente qué tan adecuado es cada material en la fabricación de columnas ligeras.

3.38 Describa posibles aplicaciones y diseños usando aleaciones que presenten el efecto Invar de baja dilatación térmica.

3.39 Reúna algunas piezas de los diferentes materiales metálicos y no metálicos que se mencionan en la tabla 3.2. Use pruebas y/o instrumentos sencillos para determinar la validez del orden descendente de las propiedades físicas mostradas en la tabla.

3.40 Diseñe un actuador para encender un interruptor cuando la temperatura caiga por debajo de cierto nivel. En su diseño, utilice dos materiales con diferentes coeficientes de dilatación térmica.

3.41 Realice una revisión en la literatura técnica y en internet y escriba un ensayo de una página donde destaque las aplicaciones de los materiales piezoeléctricos.

3.42 Se ha informado ampliamente que propiedades mecánicas como la resistencia y la ductilidad pueden ser muy distintas para los dispositivos hechos a escala microscópica de lo que son cuando se miden en escalas de longitud normal. Explique si se puede esperar, o no, que las propiedades físicas descritas en este capítulo sean dependientes de la escala.

3.43 Si le dieran a usted un metal (no una aleación) y le pidieran identificarlo, mencione (en orden) los experimentos o mediciones que realizaría. Explique la influencia que podría tener la forma del metal al señalar sus prioridades.

Aleaciones metálicas: su estructura y endurecimiento mediante tratamiento térmico

CAPÍTULO

4

- En este capítulo se examinan las estructuras de las aleaciones metálicas, incluyendo las soluciones sólidas, los compuestos intermetálicos y los sistemas de dos fases o bifásicos.
- Los diagramas de fase muestran en forma gráfica las diversas fases que se desarrollan en función de la composición y la temperatura de una aleación.
- Se describe con detalle el sistema de hierro y carbono, así como las fases involucradas en éste.
- El tratamiento térmico de los metales es un método común utilizado para mejorar las propiedades mecánicas; implica el establecimiento de una fase deseada a temperaturas elevadas que va seguida de un enfriamiento controlado antes de que la microestructura pueda transformarse al entrar a una fase diferente.
- Algunos metales, como el aluminio y el acero inoxidable, pueden tratarse térmicamente sólo mediante el endurecimiento por precipitación o el envejecimiento.
- La mejora en la ductilidad de un material se logra a expensas de propiedades como la resistencia o la dureza.
- El capítulo termina con un estudio de las características de los equipos empleados en el tratamiento térmico.

4.1	Introducción	101
4.2	Estructura de las aleaciones	102
4.3	Diagramas de fase	104
4.4	El sistema hierro-carbono	107
4.5	Diagrama de fase hierro-carburo de hierro y desarrollo de microestructuras en los aceros	108
4.6	Hierros fundidos	109
4.7	Tratamiento térmico de aleaciones ferrosas	111
4.8	Templabilidad de aleaciones ferrosas	113
4.9	Tratamiento térmico de aleaciones no ferrosas y aceros inoxidables	117
4.10	Endurecimiento superficial	119
4.11	Recocido	121
4.12	Hornos y equipos para el tratamiento térmico	123
4.13	Consideraciones de diseño para el tratamiento térmico	124

4.1 Introducción

Las propiedades y el comportamiento de los metales y las aleaciones durante su manufactura en un producto y su desempeño durante la vida de servicio dependen de su composición, estructura e historial de procesamiento, así como del tratamiento térmico al que hayan sido sometidos. Propiedades importantes como resistencia, dureza, ductilidad, tenacidad y resistencia al desgaste dependen en gran medida de los elementos de la aleación y los procesos de tratamiento térmico empleados. Las propiedades de aleaciones no tratables térmicamente se mejoran mediante trabajos mecánicos tales como laminación, forjado y extrusión (parte III).

El ejemplo más común de un proceso que mejora las propiedades es el *tratamiento térmico* (secciones 4.7 a 4.10), el cual modifica las microestructuras. Varias propiedades mecánicas que son importantes para la manufactura se desarrollan entonces, como una mayor formabilidad y maquinabilidad o un aumento de la resistencia y la dureza para lograr un mejor desempeño de herramientas y troqueles. Estas propiedades también mejoran el rendimiento del servicio en engranajes (figura 4.1), levas, flechas, herramientas, troqueles y moldes.

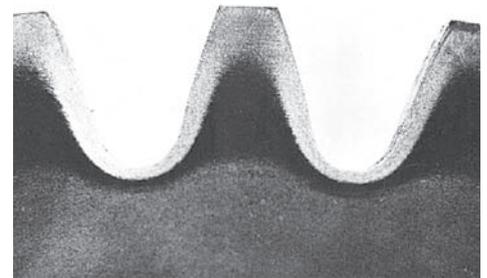


FIGURA 4.1 Sección transversal de los dientes de un engrane que muestra las superficies endurecidas por inducción. Fuente: TOCCO Div., Park-Ohio Industries, Inc.

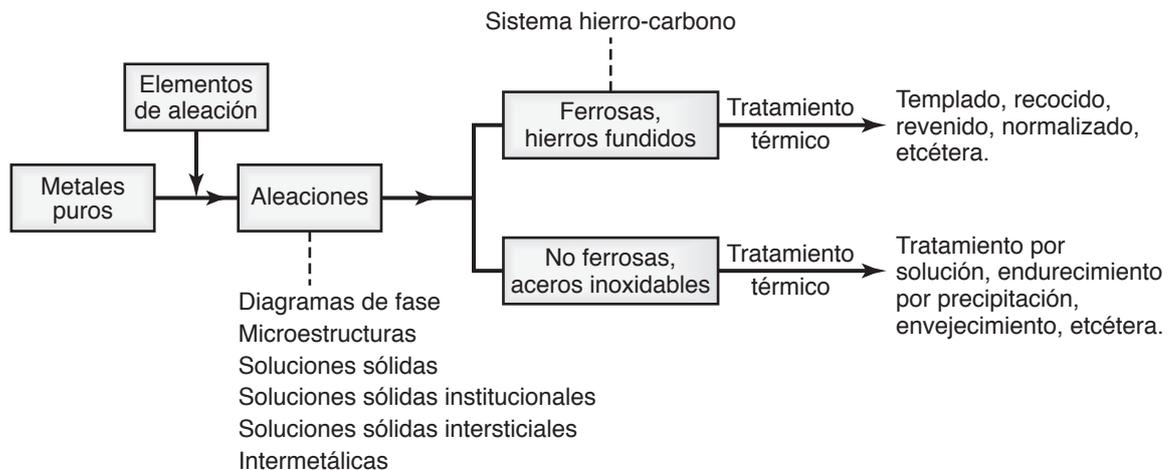


FIGURA 4.2 Resumen de los temas descritos en este capítulo.

En este capítulo se sigue el esquema mostrado en la figura 4.2, comenzando con el papel de los diversos elementos de aleación, la solubilidad de un elemento en otro, las fases, los diagramas de fase de equilibrio y la influencia de la composición, la temperatura y el tiempo. En el capítulo también se analizan los métodos y las técnicas de calentamiento, templado, revenido y recocido de los metales y sus aleaciones y se describen las características de los equipos involucrados en estos procesos.

4.2 Estructura de las aleaciones

Cuando se describió la estructura cristalina básica de los metales en el capítulo 1, se observó que todos sus átomos son del *mismo* tipo excepto por la presencia de átomos de impurezas raras; estos metales se conocen como **metales puros**, aunque pueden no ser completamente puros. Los metales *comercialmente puros* se utilizan para diversos propósitos, tales como el aluminio para elaborar hojas, el cobre para conductores eléctricos, el níquel o el cromo para el chapado y oro para los contactos eléctricos. Los metales puros tienen propiedades algo limitadas, pero éstas pueden mejorarse y modificarse mediante las **aleaciones**. Una **aleación** consta de dos o más elementos químicos, de los cuales por lo menos uno es un metal; la mayoría de los metales utilizados en las aplicaciones de ingeniería están constituidos por algún tipo de aleación. La aleación consiste en dos formas básicas: *soluciones sólidas* y *compuestos intermetálicos*.

4.2.1 Soluciones sólidas

Existen dos términos que son esenciales para describir las aleaciones: el **soluto** y el **solvente**. El soluto es el elemento *minoritario* (como la sal o el azúcar) que se añade al solvente, que es el elemento *mayoritario* como el agua. En términos de los elementos presentes en una estructura cristalina, el soluto (compuesto por *átomos en menor cantidad*) es el elemento que se añade al solvente (compuesto por *una mayor cantidad de átomos*). Cuando la estructura cristalina particular del solvente se mantiene durante la aleación, a ésta se le denomina *solución sólida*.

Soluciones sólidas sustitucionales. Si el tamaño del átomo de soluto es similar al del átomo de solvente, los átomos de soluto pueden sustituir a los átomos de solvente y formar una *solución sólida sustitucional* (vea la figura 1.8). Un ejemplo de solu-

ción sólida sustitucional es el latón, que es una aleación de zinc y cobre en la cual se introduce zinc (el átomo de soluto) en la red del cobre (los átomos de solvente). Así, las propiedades del latón se pueden modificar al controlar la cantidad de zinc que se integra al cobre.

Soluciones sólidas intersticiales. Si el tamaño del átomo de soluto es mucho menor que el del átomo de solvente, cada átomo de soluto puede ocupar una posición *intersticial*; dicho proceso forma una *solución sólida intersticial*.

Una familia importante de soluciones sólidas intersticiales es la del **acero** (capítulo 5), una aleación de hierro y carbono en la que los átomos de carbono están presentes en posiciones intersticiales entre los átomos de hierro. El radio atómico del carbono es de 0.071 nm, que es muy pequeño en comparación con el radio del átomo de hierro de 0.124 nm. Las propiedades de los aceros al carbono pueden variar en un amplio rango al ajustar la relación de carbono a hierro. La capacidad de poder controlar esta relación es una razón importante por la que el acero es un material tan versátil y útil con una muy amplia variedad de propiedades y aplicaciones.

4.2.2 Compuestos intermetálicos

Los **compuestos intermetálicos** son estructuras complejas que constan de dos metales en los que los átomos de soluto están presentes entre los átomos de solvente en ciertas proporciones. Ejemplos típicos son los aluminuros de titanio (Ti_3Al), de níquel (Ni_3Al) y de hierro (Fe_3Al). Algunos compuestos intermetálicos tienen solubilidad sólida y el tipo de enlace atómico puede variar de metálico a iónico. Los compuestos intermetálicos son fuertes, duros y frágiles. Debido a sus altos puntos de fusión, resistencia a las temperaturas elevadas, buena resistencia a la oxidación y relativamente baja densidad, son candidatos a ser usados en aplicaciones tales como los motores avanzados de turbina a gas.

4.2.3 Sistemas de dos fases o bifásicos

Recuerde que una solución sólida es aquella en la que dos o más elementos forman una sola fase sólida homogénea, donde los elementos se distribuyen de manera uniforme por toda la masa sólida. Tal sistema tiene una concentración máxima de átomos de soluto en la red de átomos de solvente, de la misma forma que hay un límite de solubilidad para el azúcar en agua. La mayoría de las aleaciones se componen de dos o más fases sólidas y pueden considerarse como mezclas mecánicas; un sistema con dos fases sólidas se conoce como *sistema de dos fases* o *bifásico*.

Una **fase** se define como una porción físicamente distinta y homogénea presente en un material. Cada fase es una parte homogénea de la masa total y tiene sus propias características y propiedades. Considere una mezcla de arena y agua como ejemplo de un sistema de dos fases. Estos dos componentes tienen sus propias estructuras, características y propiedades distintivas; hay un límite claro en esta mezcla entre el agua (una fase) y las partículas de arena (la segunda fase). Otro ejemplo es el hielo en agua: las dos fases son del mismo compuesto químico con exactamente los mismos elementos químicos (hidrógeno y oxígeno), sin embargo, con propiedades muy diferentes. Observe que no es necesario que una de las fases sea un líquido; por ejemplo, la arena suspendida en el hielo también es un sistema de dos fases.

En los metales, un ejemplo típico de un sistema bifásico, se produce cuando se añade plomo al cobre en estado fundido. Después de que la mezcla se solidifica, la estructura consta de dos fases: una fase tiene una pequeña cantidad de plomo en solución sólida en el cobre y la otra fase se compone de partículas de plomo (que tienen una forma aproximadamente esférica) *dispersas* por toda la estructura (figura 4.3a). Las partículas de plomo son análogas a las partículas de arena en agua recién descritas aquí. Esta aleación de cobre y plomo tiene propiedades diferentes a las del cobre o el plomo por sí solos.

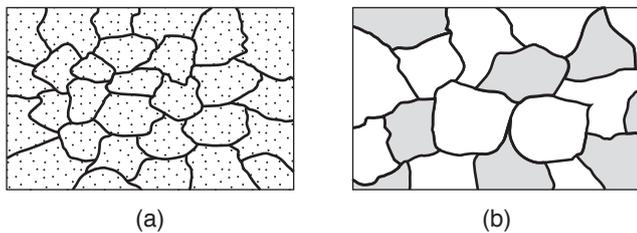


FIGURA 4.3 (a) Ilustración esquemática de granos, fronteras de grano y partículas dispersas por toda la estructura de un sistema bifásico, como en el caso de una aleación de plomo y cobre. Los granos representan al plomo en solución sólida en el cobre y las partículas son el plomo como una segunda fase. (b) Ilustración esquemática de un sistema bifásico que consta de dos conjuntos de granos: oscuros y claros. Uno y otro tipo de granos tienen diferentes composiciones y propiedades.

La aleación con partículas finamente dispersas (**partículas de segunda fase**) es un método importante para el endurecimiento de las aleaciones metálicas y para el control de sus propiedades. En las aleaciones de dos fases, las partículas de segunda fase se convierten en obstáculos para el movimiento de las dislocaciones y, por lo tanto, aumentan la resistencia de la aleación. Otro ejemplo de una aleación bifásica es la estructura agregada que se muestra en la figura 4.3b, donde hay dos conjuntos de granos, cada uno con su propia composición y sus propiedades particulares. En esta figura, los granos más oscuros pueden tener una estructura diferente de la de los granos más claros; por ejemplo, pueden ser frágiles, mientras que los granos más claros son dúctiles.

Durante las operaciones de trabajo con metales, como el forjado o la extrusión (que se describen en los capítulos 14 y 15, respectivamente), es posible que se desarrollen defectos. Tales defectos pueden deberse a la falta de ductilidad de una de las fases de la aleación. En general, las aleaciones bifásicas son más resistentes y menos dúctiles que las soluciones sólidas.

4.3 Diagramas de fase

Los metales puros tienen puntos de fusión o de solidificación claramente definidos, y la solidificación ocurre a una *temperatura constante*. Cuando la temperatura de un metal fundido se reduce hasta el punto de solidificación, la energía o *calor latente de solidificación* se desprende mientras que la temperatura se mantiene constante. En algún momento, la solidificación se completa y el metal sólido continúa su enfriamiento hasta la temperatura ambiente (del entorno).

A diferencia de los metales puros, las aleaciones se solidifican en cierto rango de temperaturas (figura 4.4). La solidificación comienza cuando la temperatura del metal fundido cae por debajo de la línea **liquidus**; se completa cuando la temperatura alcanza la línea de **solidus**. Dentro de este rango de temperaturas, la aleación se encuentra en un estado *espososo* o *pastoso*; su composición y estado se describen entonces mediante el diagrama de fase particular de la aleación.

Un diagrama de fase, también llamado diagrama de **equilibrio** o constitucional, muestra las relaciones entre la temperatura, la composición y las fases presentes en un sistema particular de aleación en equilibrio. El término *equilibrio* significa que el estado de un sistema no varía con el tiempo; la palabra *constitucional* indica las relaciones entre la estructura, la composición y la estructura física de la aleación. Tal como se describirá detalladamente a continuación, los tipos de diagramas de fase incluyen los de (a) las soluciones sólidas completas; (b) los eutécticos, como el hierro fundido; y (c) los eutectoides, como los aceros.

En la figura 4.4 se muestra un ejemplo de un diagrama de fase para la aleación de cobre y níquel; se le denomina **diagrama de fase binario** porque en el sistema hay dos elementos presentes (cobre y níquel). La frontera izquierda de este diagrama de fase (100% de Ni) indica el punto de fusión del níquel puro, la frontera derecha (100% de Cu) indica el punto de fusión del cobre puro. (Todos los porcentajes se dan en peso, no de acuerdo con el número de átomos).

Regla de la palanca. En un diagrama de fase, la composición de varias fases puede determinarse mediante un procedimiento llamado *regla de la palanca*. Como se muestra en la parte inferior de la figura 4.4, primero se construye una palanca entre las líneas del solidus y el liquidus (llamada *línea de enlace*), que se equilibra (sobre el soporte triangular) en la composición de peso nominal C_o de la aleación. El extremo izquierdo de la palanca representa la composición C_S de la fase sólida y el extremo derecho representa la composición C_L de la fase líquida. A partir de la escala graduada de la figura, observe que la fracción líquida también está indicada a lo largo de esta línea de enlace, que va desde 0 a la izquierda (completamente sólida) hasta 1 a la derecha (totalmente líquida).

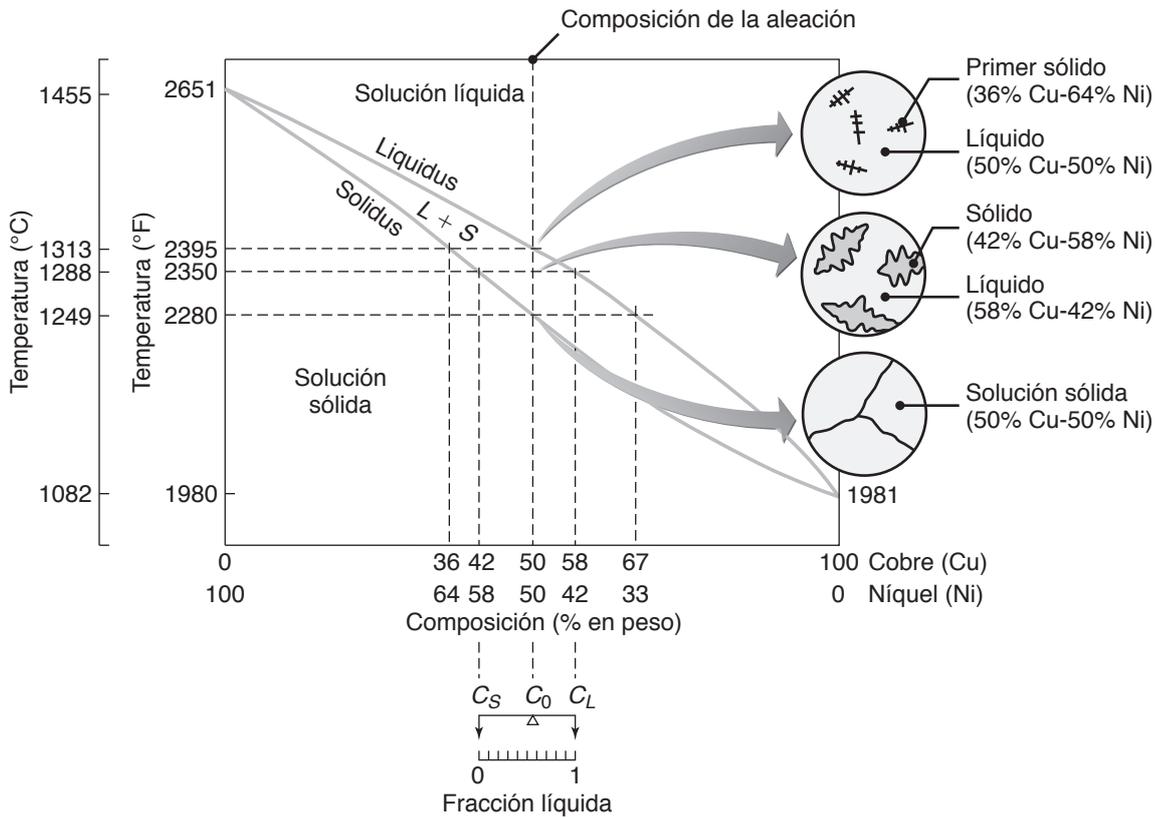


FIGURA 4.4 Diagrama de fase para el sistema de aleación de cobre y níquel obtenido a una velocidad lenta de solidificación. Observe que el níquel puro y el cobre puro tienen cada uno una temperatura de solidificación o de fusión. El círculo superior derecho muestra la nucleación de cristales. El segundo círculo muestra la formación de dendritas (vea la sección 10.2.2). El círculo inferior muestra la aleación solidificada, con fronteras de grano.

La regla de la palanca establece que la **fracción en peso de sólido** es proporcional a la distancia entre C_o y C_L :

$$\frac{S}{S+L} = \frac{C_o - C_L}{C_S - C_L} \quad (4.1)$$

De igual modo, la **fracción en peso de líquido** es proporcional a la distancia entre C_S y C_o , por lo tanto:

$$\frac{L}{S+L} = \frac{C_S - C_o}{C_S - C_L} \quad (4.2)$$

Tenga en cuenta que estas cantidades son fracciones y deben multiplicarse por 100 para obtener porcentajes.

A partir de la inspección de la línea de enlace de la figura 4.4 (y para una composición de aleación nominal con $C_o = 50\%$ Cu-50% Ni) se puede observar que, debido a que C_o está más cerca de C_L de lo que lo está de C_S , la fase sólida contiene menos cobre que la fase líquida. Mediante la medición en el diagrama de fase y el uso de las ecuaciones de la regla de la palanca, se puede ver que la composición de la fase sólida es 42% Cu y la de la fase líquida es 58% Cu, como se indica en el círculo medio a la derecha en la figura 4.4. Estos cálculos se refieren al cobre. Si ahora invertimos el diagrama de fase en la figura, de modo que el límite izquierdo es 0% de níquel (por lo que ahora el níquel

se convierte en el elemento de aleación en cobre), estos cálculos nos darán las composiciones de las fases sólida y líquida en términos del níquel. La regla de la palanca también se conoce como *regla de la palanca inversa* porque, tal como lo indican las ecuaciones (4.1) y (4.2), la cantidad de cada fase es proporcional a la longitud del extremo opuesto de la palanca.

La aleación *completamente solidificada* que se muestra en el diagrama de fase en la figura 4.4 es una *solución sólida* porque el elemento de aleación, Cu (el átomo de soluto), se disuelve completamente en el metal con una *mayor cantidad de átomos*, Ni (el átomo de solvente), y cada grano tiene la misma composición. El radio atómico del cobre es de 0.128 nm y el del níquel de 0.125 nm; ambos elementos tienen una estructura cúbica centrada en las caras y por ello forman soluciones sólidas con facilidad.

Las propiedades mecánicas de las soluciones sólidas de la aleación Cu-Ni dependen de su composición (figura 4.5). Las propiedades del cobre puro se ven, hasta cierto punto, mejoradas por el aumento del contenido de níquel, por lo que existe un porcentaje óptimo de níquel que proporciona la más alta resistencia y dureza a la aleación Cu-Ni.

En la figura 4.5 también se muestra la forma en que el zinc, como elemento de la aleación en cobre, afecta las propiedades mecánicas de la aleación. Observe la máxima solubilidad sólida de 40% para el zinc (soluto) en cobre (solvente), mientras que el cobre y el níquel son completamente solubles entre sí. Las mejoras en las propiedades se deben al *bloqueo* de las dislocaciones (sección 1.4.1) en los átomos sustitucionales de níquel o zinc, que también pueden verse como átomos de impurezas. En consecuencia, las dislocaciones no pueden moverse tan libremente y, por lo tanto, la resistencia de la aleación se incrementa.

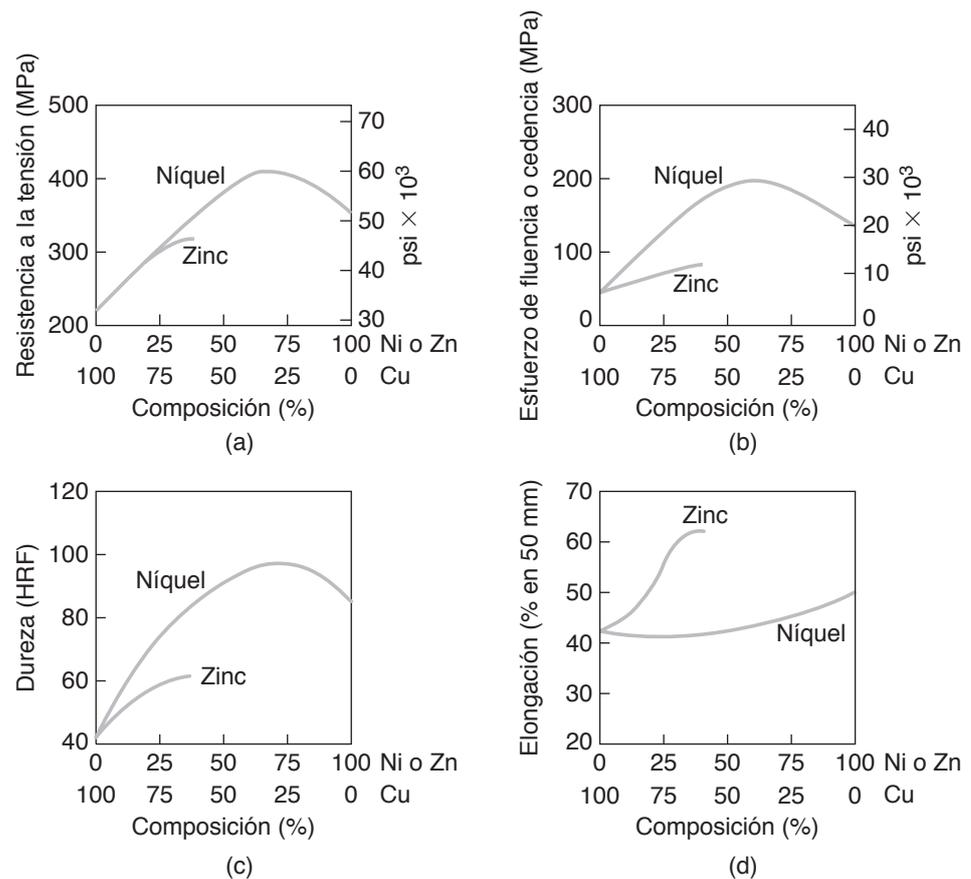


FIGURA 4.5 Propiedades mecánicas de las aleaciones cobre-níquel y cobre-zinc en función de su composición. Las curvas para el zinc son cortas, puesto que el zinc tiene un valor máximo de solubilidad sólida en el cobre del 40 por ciento.

4.4 El sistema hierro-carbono

Los aceros y los hierros fundidos están representados por el sistema binario hierro-carbono. El hierro comercialmente puro contiene hasta 0.008% de C, los aceros hasta 2.11% de C y los hierros fundidos hasta 6.67% de C, aunque la mayoría de éstos contienen menos de 4.5% de C. En esta sección se describe el sistema hierro-carbono, incluyendo las técnicas empleadas para evaluar y modificar las propiedades de estos materiales tan importantes para aplicaciones específicas.

En la figura 4.6 se muestra el **diagrama de fase de hierro-carburo de hierro**. Aunque este diagrama puede extenderse hasta la derecha —hasta 100% de C (grafito puro; vea la figura 4.10)—, el rango significativo para las aplicaciones de ingeniería es de hasta 6.67% de C porque el Fe_3C es una fase estable. El hierro puro se funde a una temperatura de 1538 °C (2798 °F), como se muestra en la frontera izquierda de la figura 4.6. A medida que el hierro se enfría, primero forma ferrita (delta), después austenita y, finalmente, ferrita alfa.

Ferrita. La ferrita alfa, denotada también por ferrita- α o simplemente como ferrita, es una solución sólida de hierro cúbico centrado en el cuerpo (bcc, por sus siglas en inglés); tiene una solubilidad sólida máxima de 0.022% de C a una temperatura de 727 °C (1341 °F). De la misma forma que hay un límite de solubilidad para la sal en agua (donde cualquier cantidad extra de sal se precipita como sólido en el fondo del recipiente), también existe un límite de solubilidad en estado sólido para el carbono en hierro.

La ferrita es relativamente blanda y dúctil; es magnética desde la temperatura ambiente hasta los 768 °C (1414 °F), la denominada *temperatura Curie* (en honor de la física y química polaca M. Curie, 1867-1934). Aunque en el hierro bcc sólo puede disolverse muy poco carbono en forma intersticial, la cantidad de carbono puede afectar significativamente las propiedades mecánicas de la ferrita. Además, el hierro en solución sólida puede contener cantidades significativas de cromo, manganeso, níquel, molibdeno, tungsteno y silicio, mismas que le confieren propiedades especiales.

Austenita. Como se muestra en la figura 4.6, dentro de cierto rango de temperatura, el hierro experimenta una **transformación polimórfica** a partir de una estructura bcc hacia

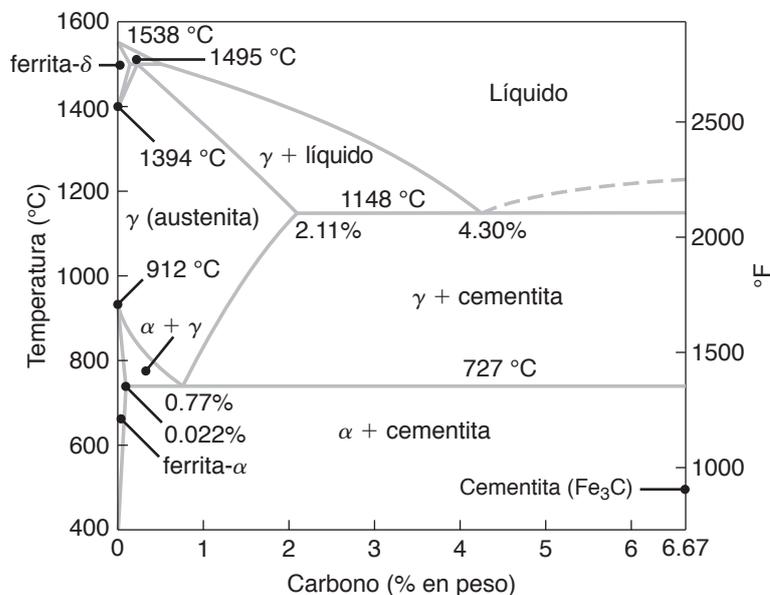


FIGURA 4.6 El diagrama de fase hierro-carburo de hierro.

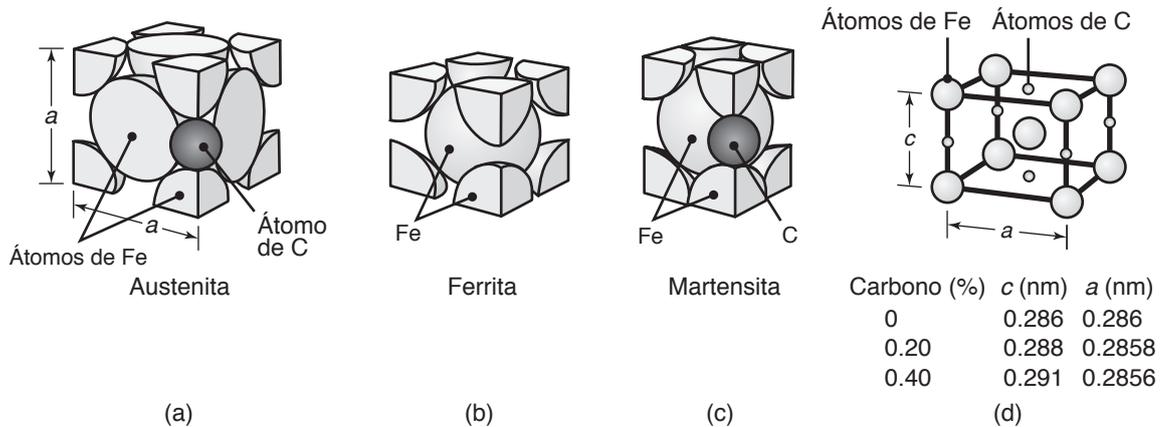


FIGURA 4.7 Celdas unitarias para (a) la austenita, (b) la ferrita y (c) la martensita. En (d) se muestra el efecto del porcentaje de carbono (en peso) sobre las dimensiones de la red para la martensita; observe la posición intersticial de los átomos de carbono (vea la figura 1.8). Observe también el aumento de la dimensión c con el incremento del contenido de carbono; este efecto hace que la celda unitaria de martensita adquiera la forma de un prisma rectangular.

una fcc, convirtiéndose en *hierro gama* (hierro- γ) o, más comúnmente, **austenita** (en honor del metalúrgico británico W. C. Roberts-Austen, 1843-1902). Esta estructura tiene una solubilidad en estado sólido de hasta 2.11% de C a 1148 °C (2098 °F). Debido a que la estructura fcc tiene más posiciones intersticiales, la solubilidad en estado sólido de la austenita es aproximadamente dos veces más grande que la de la ferrita, con el carbono ocupando posiciones intersticiales tal como se muestra en la figura 4.7a.

La austenita es una fase importante en el tratamiento térmico de los aceros (sección 4.7). Es más densa que la ferrita y su estructura monofásica fcc es dúctil a temperaturas elevadas y, en consecuencia, posee una buena formabilidad. También se pueden disolver grandes cantidades de níquel y manganeso en hierro fcc para impartir diversas propiedades. El acero es no magnético en su forma austenítica, ya sea a elevadas temperaturas o, para los aceros inoxidable austeníticos, a temperatura ambiente.

Cementita. La frontera derecha de la figura 4.6 representa la **cementita**, que es 100% carburo de hierro (Fe_3C), con un contenido de carbono del 6.67%. La cementita (del latín *caementum*, que significa “astillas de piedra”) también se conoce como **carburo**, pero no debe confundirse con otros carburos utilizados en dados, en herramientas de corte y en abrasivos, tales como el carburo de tungsteno, el carburo de titanio y el carburo de silicio (capítulos 8 y 22). La cementita es un compuesto intermetálico muy duro y frágil con una influencia de gran importancia en las propiedades de los aceros. Puede incluir otros elementos de aleación como el cromo, el molibdeno y el manganeso.

4.5 Diagrama de fase hierro-carburo de hierro y desarrollo de microestructuras en los aceros

La región del diagrama de fase hierro-carburo de hierro que es importante para los aceros se muestra en la figura 4.8 (una ampliación de la parte inferior izquierda de la figura 4.6). Se pueden desarrollar varias microestructuras en función de: (a) el contenido de carbono, (b) la cantidad de deformación plástica (trabajado mecánico) y (c) el método de tratamiento térmico. Por ejemplo, considere el **punto eutéctico** del acero con un contenido de 0.77% de C mientras se enfría muy lentamente a partir de una temperatura, por ejemplo, de 1100 °C (2000 °F) en la fase de austenita. La razón por la que se realiza un enfriamiento muy lento es mantener el equilibrio.

A 727 °C (1341 °F), se presenta una reacción en la que la austenita se transforma en ferrita alfa (bcc) y cementita. Debido a que la solubilidad en estado sólido del carbono en la ferrita es de sólo 0.022%, el carbono adicional forma cementita. Esta reacción se denomina reacción **eutectoide** (que significa *del tipo eutéctico*), lo anterior implica que, a una determinada temperatura, una sola fase sólida (austenita) se transforma en otras dos fases sólidas (ferrita y cementita).

La estructura de acero eutectoide se denomina perlita porque, a bajas magnificaciones, se asemeja a la madreperla (figura 4.9). La microestructura de la perlita se compone de laminillas alternadas de ferrita y cementita y, en consecuencia, las propiedades mecánicas de la perlita son intermedias entre las de la ferrita (blanda y dúctil) y la cementita (dura y frágil).

4.5.1 Efectos de los elementos de aleación en el hierro

Aunque el carbono es el elemento básico que transforma el hierro en acero, también se agregan otros elementos para impartir una variedad de propiedades deseables. El efecto principal de estos elementos de aleación en el diagrama de fase hierro-carburo de hierro es cambiar la temperatura eutectoide y la composición eutectoide (porcentaje de carbono en el acero en el punto eutectoide); asimismo, estos elementos cambian otras fronteras de fase.

La temperatura eutectoide puede elevarse o disminuirse, desde 727 °C (1341 °F), dependiendo del elemento de aleación particular. Por otro lado, los elementos de aleación siempre disminuyen la composición eutectoide; es decir, su contenido de carbono es inferior a 0.77%. La reducción de la temperatura eutectoide significa aumentar el rango de austenita y, como resultado, un elemento de aleación como el níquel se denomina **formador de austenita** debido a que el níquel tiene una estructura fcc, que favorece la estructura fcc de la austenita. Por el contrario, el cromo y el molibdeno tienen una estructura bcc que favorece la estructura bcc de la ferrita; estos elementos se conocen como **estabilizadores de ferrita**.

4.6 Hierros fundidos

El término **hierro fundido** se refiere a una familia de aleaciones ferrosas compuestas por hierro, carbono (que va de 2.11% a aproximadamente 4.5%) y silicio (hasta casi 3.5%). Los hierros fundidos suelen clasificarse según su morfología de solidificación a partir de la temperatura eutéctica (vea también la sección 12.3.2):

1. Hierro fundido gris o hierro gris.
2. Hierro fundido dúctil, también llamado hierro fundido nodular o hierro fundido de grafito esferoidal.
3. Hierro fundido blanco.
4. Hierro maleable.
5. Hierro fundido de grafito compactado.

Los hierros fundidos también se clasifican según su estructura en: ferríticos, perlíticos, templados y revenidos o bainíticos o ausrevenidos.

En la figura 4.10 se muestra el diagrama de fase de equilibrio relevante para los hierros fundidos, en el que la frontera derecha es 100% C —es decir, grafito puro—. Debido

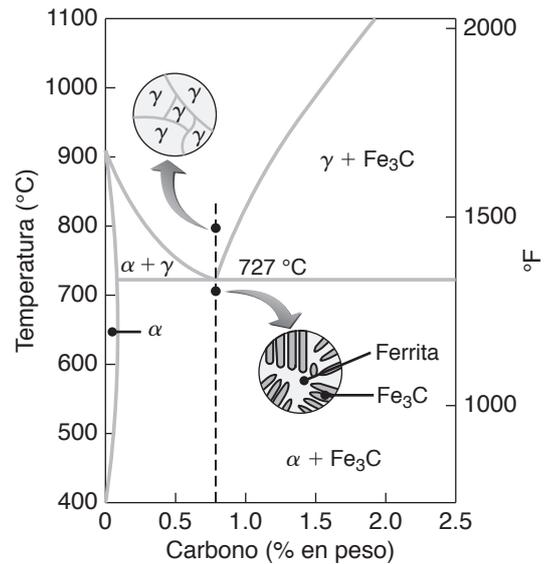


FIGURA 4.8 Ilustración esquemática de las microestructuras de una aleación de hierro-carbono de composición eutectoide (0.77% de carbono), por encima y por debajo de la temperatura eutectoide de 727 °C (1341 °F).

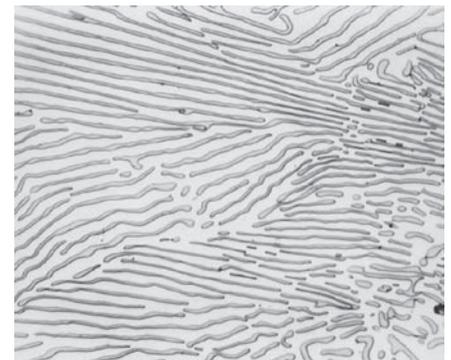


FIGURA 4.9 Microestructura de perlita en el acero 1080, formado a partir de austenita de composición eutectoide. En esta estructura laminar, las regiones más claras son de ferrita y las más oscuras son de carburo. Ampliación: 2500x.

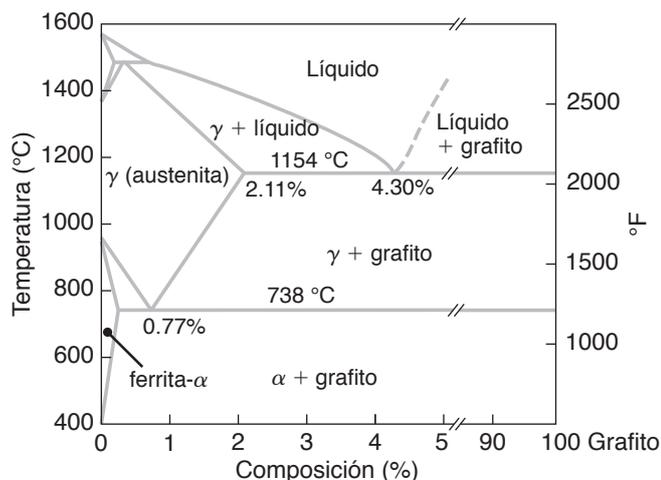


FIGURA 4.10 Diagrama de fase para el sistema hierro-carbono con grafito (en vez de cementita) como la fase estable; observe que esta figura es una versión extendida de la figura 4.6.

a que la temperatura eutéctica es de 1154 °C (2109 °F), los hierros fundidos se encuentran en estado completamente líquido a temperaturas más bajas que las requeridas para los aceros en estado de agregación líquido. En consecuencia, el hierro con alto contenido de carbono puede fundirse (vea la parte II de este libro) a temperaturas más bajas que los aceros.

La cementita no es completamente estable sino **metaestable** con una muy baja rapidez de descomposición. Sin embargo, puede descomponerse en alfa ferrita y grafito. La formación de grafito (**grafitización**) puede ser controlada, promovida y acelerada mediante la modificación de la composición, la velocidad de enfriamiento y al añadir silicio.

Hierro fundido gris. En esta estructura, el grafito existe en gran cantidad en forma de *hojuelas* (figura 4.11a). Se le llama **hierro fundido gris** o **hierro gris** porque, cuando se rompe, la trayectoria de la fractura se da a lo largo de las hojuelas de grafito y tiene una apariencia de hollín gris. Estas hojuelas actúan como elevadores

del esfuerzo y, como resultado, el hierro gris tiene ductilidad insignificante y es débil en tensión, aunque resistente a la compresión. Por otro lado, la presencia de hojuelas de grafito le da a este material la capacidad de amortiguar las vibraciones (debido a la fricción interna). Esta capacidad hace del hierro fundido gris un material adecuado y de uso común en la construcción de bases de máquinas herramientas y estructuras de maquinaria (sección 25.3).

Tres tipos de hierro fundido gris son **ferrítico**, **perlítico** y **martensítico**; debido a sus diferentes estructuras, cada uno tiene distintas propiedades y aplicaciones. En el hierro gris ferrítico (también conocido como *hierro completamente gris*), la estructura se compone de hojuelas de grafito en una matriz de alfa ferrita. El hierro gris perlítico tiene una estructura de grafito en una matriz perlítica y, aunque sigue siendo frágil, es más resistente que el hierro completamente gris. El hierro gris martensítico se obtiene al austenizar un hierro gris perlítico que después se tiempla rápidamente para producir una estructura de grafito en una matriz martensítica; como resultado, este hierro fundido es muy duro.

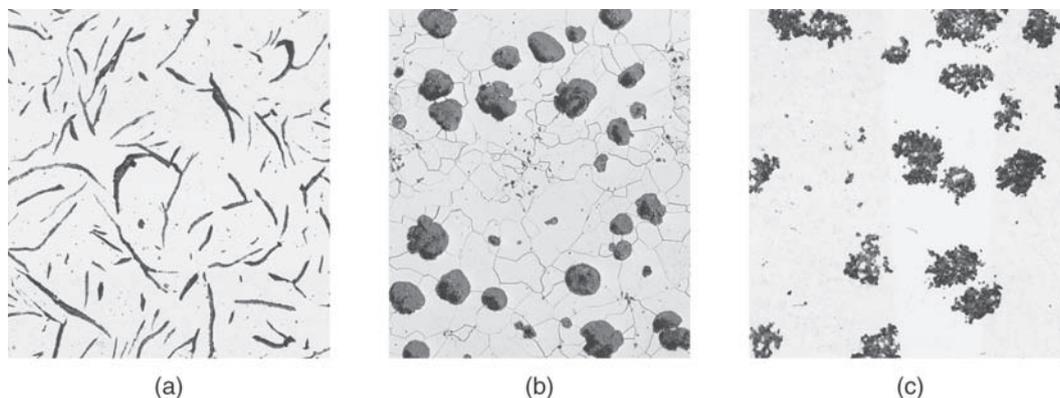


FIGURA 4.11 Microestructura para los hierros fundidos. Magnificación: 100×. (a) Hierro fundido gris ferrítico con hojuelas de grafito. (b) Hierro dúctil ferrítico (hierro nodular) con grafito en forma nodular. (c) Hierro maleable ferrítico; este hierro fundido se solidificó como hierro fundido blanco, teniendo el carbono presente en forma de cementita, y se trató térmicamente para grafitizar el carbono.

Hierro dúctil (nodular). En la estructura del hierro dúctil, el grafito está en una forma **nodular** o **esferoidal** (figura 4.11b), la cual permite que el material sea algo dúctil y resistente a los impactos. La forma en hojuelas del grafito puede cambiarse a nódulos (esferas) mediante pequeñas adiciones de magnesio y/o de cerio al metal fundido antes de verter. El hierro dúctil puede hacerse ferrítico o perlítico por medio del tratamiento térmico; también puede ser tratado térmicamente para obtener una estructura de martensita revenida (sección 4.7).

Hierro fundido blanco. El *hierro fundido blanco* se obtiene al enfriar el hierro gris rápidamente o al ajustar la composición manteniendo el contenido de carbono y silicio en niveles bajos; también se denomina *fundición blanca* debido a la apariencia cristalina blanca de la superficie de fractura. La estructura del hierro fundido blanco es muy dura, resistente al desgaste y frágil debido a la presencia de grandes cantidades de carburo de hierro (en vez de grafito).

Hierro maleable. El *hierro maleable* se obtiene mediante el recocido del hierro fundido blanco en una atmósfera de monóxido de carbono y dióxido de carbono, a una temperatura de entre 800 y 900 °C (1470 y 1650 °F), durante un periodo de hasta varias horas dependiendo del tamaño de la pieza. Durante este proceso, la cementita se descompone (*disocia*) en hierro y grafito. El grafito existe en forma de *racimos* o *rosetas* (figura 4.11c) en una matriz de ferrita o perlita; en consecuencia, el hierro maleable tiene una estructura similar a la del hierro nodular. Esta estructura promueve una buena ductilidad, la resistencia mecánica y la resistencia al impacto; de ahí el término *maleable* (del latín *malleus*, “que puede ser martillado”).

Hierro de grafito compactado. En esta estructura el grafito se presenta en forma de hojuelas gruesas, cortas e interconectadas que tienen superficies onduladas y extremidades redondeadas. Las propiedades mecánicas y físicas de este hierro fundido son intermedias entre las de los hierros fundidos de hojuelas de grafito y de grafito nodular.

4.7 Tratamiento térmico de aleaciones ferrosas

Las diversas microestructuras descritas hasta ahora pueden modificarse mediante técnicas de tratamiento térmico; es decir, por medio de calentamiento y enfriamiento controlados de las aleaciones a distintas velocidades. Estos tratamientos inducen **transformaciones de fase**, las cuales influyen en gran medida sobre propiedades mecánicas como la resistencia, la dureza, la ductilidad, la tenacidad y la resistencia al desgaste. Los efectos del tratamiento térmico dependen de la aleación particular, de su composición y microestructura, del grado de trabajo en frío previo y de las velocidades de calentamiento y enfriamiento aplicadas durante el tratamiento térmico.

Esta sección se enfoca en los cambios microestructurales del sistema hierro-carbono. Debido a su importancia tecnológica, las estructuras consideradas son la perlita, la esferoidita, la bainita, la martensita y la martensita revenida. Los procesos de tratamiento térmico descritos son el recocido, el templeado y el revenido.

Perlita. Si en la estructura de perlita del acero eutectoide, que se muestra en la figura 4.9, las láminas de ferrita y cementita son finas y están muy juntas entonces la microestructura se denomina **perlita fina**; si dichas láminas son gruesas y están muy espaciadas se llama **perlita gruesa**. La diferencia entre estas dos estructuras depende de la velocidad de enfriamiento a través de la temperatura eutectoide, que es el sitio de una reacción en la que la austenita se transforma en perlita. Si la velocidad de enfriamiento es relativamente alta (como en el aire) se produce una perlita fina; si el enfriamiento es lento (como en el interior de un horno) se produce una perlita gruesa.

Esferoidita. Cuando la perlita se calienta justo por debajo de la temperatura eutectoide y después se mantiene a esa temperatura durante un periodo determinado, por ejemplo a



Código QR 4.1 Cadenas de endurecimiento con calentamiento por inducción. (Fuente: Cortesía de GH Induction Atmospheres).

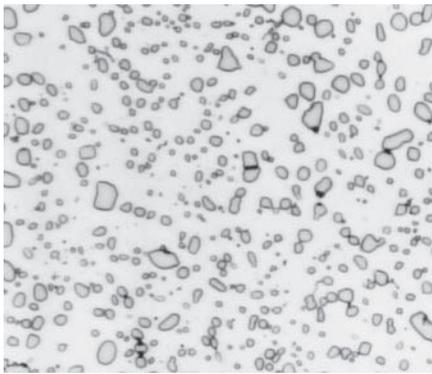


FIGURA 4.12 Microestructura del acero eutectoide. La esferoidita se forma al reventar el acero a 700 °C (1292 °F). Ampliación: 1000x.

700 °C (1292 °F) durante un día, las láminas de cementita se transforman en formas más o menos esféricas (figura 4.12). A diferencia de las formas laminares de cementita, que actúan como elevadores de esfuerzos, las **esferoiditas** (partículas esféricas) tienen concentraciones de esfuerzo más pequeñas debido a sus formas redondeadas. Por consiguiente, esta estructura tiene mayor tenacidad y menor dureza que la estructura de perlita. Puede trabajarse en frío porque la ferrita dúctil tiene alta tenacidad y las partículas esferoidales de carburo evitan el inicio de grietas dentro del material.

Bainita. La *bainita*, que sólo es visible a través de microscopía electrónica, es una microestructura muy fina constituida por ferrita y cementita; es similar a la perlita, pero tiene una morfología diferente. La bainita se puede producir en aceros con elementos de aleación y a velocidades de enfriamiento más altas que las requeridas para la perlita. Esta estructura, llamada de **acero bainítico** (en honor del metalúrgico estadounidense E. C. Bain, 1891-1971), suele ser más resistente y dúctil que los aceros perlíticos ubicados en el mismo nivel de dureza.

Martensita. Cuando la austenita se enfría a una velocidad elevada, por ejemplo mediante el temple en agua, su estructura fcc se transforma en una estructura **tetragonal centrada en el cuerpo** (bct, por sus siglas en inglés), la cual puede describirse como un prisma rectangular centrado en el cuerpo que está ligeramente alargado sobre uno de sus ejes principales (vea la figura 4.7d). Esta microestructura se denomina *martensita* (en honor del metalúrgico alemán A. Martens, 1850-1914). Como la martensita no tiene tantos sistemas de deslizamiento como una estructura bcc, y el carbono se encuentra en posiciones intersticiales, es muy dura y frágil (figura 4.13). La transformación martensítica tiene lugar casi instantáneamente porque no implica el proceso de difusión sino un mecanismo de deslizamiento y, por lo tanto, involucra una deformación plástica. Éste es un fenómeno dependiente del tiempo que también es el mecanismo en otras transformaciones.

Austenita retenida. Si la temperatura a la que se temple la aleación no es suficientemente baja, sólo una parte de la estructura se transforma en martensita. El resto es *austenita retenida*, la cual puede observarse como áreas blancas en la estructura, junto con la martensita oscura, en forma de agujas. La austenita retenida puede causar inestabilidad dimensional y agrietamiento, así como una disminución en la dureza y resistencia de la aleación.

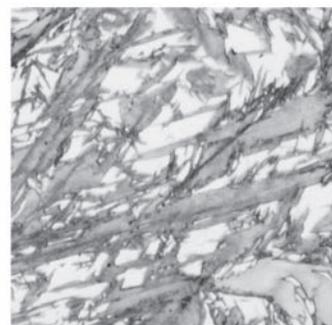
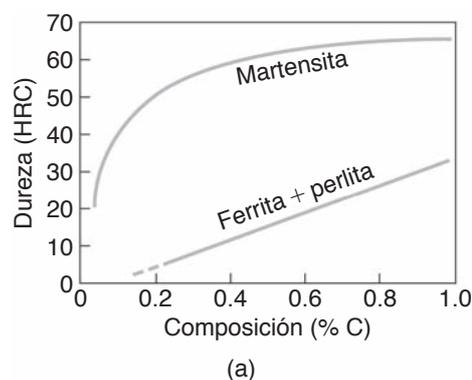


FIGURA 4.13 (a) Dureza de la martensita como una función del contenido de carbono. (b) Micrografía de una martensita que contiene 0.8% de carbono. Las regiones grises en forma de placa son martensita; tienen la misma composición que la austenita original (regiones blancas). Ampliación: 1000x.

Martensita revenida. La martensita se reviene con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. El *revenido* es un proceso de calentamiento mediante el cual se reduce la dureza y se incrementa la tenacidad. La martensita tetragonal centrada en el cuerpo se calienta a una temperatura intermedia, típicamente entre 150 y 650 °C (300–1200 °F), donde se descompone en una microestructura de dos fases que consiste en ferrita alfa bcc y pequeñas partículas de cementita.

Con el aumento del tiempo de revenido y de la temperatura, la dureza de la martensita revenida disminuye (figura 4.14). La razón es que las partículas de cementita se unen y crecen y en la matriz de ferrita blanda la distancia entre las partículas aumenta conforme las partículas de carburo menos estables y más pequeñas se disuelven.

4.7.1 Diagramas de tiempo-temperatura-transformación

El porcentaje de austenita transformada en perlita es una función de la temperatura y del tiempo (figura 4.15a). Esta transformación se ilustra mejor en las figuras 4.15b y c en diagramas llamados **diagramas de transformación isotérmica (TI)**, o *diagramas de tiempo-temperatura-transformación (TTT)*, construidos a partir de los datos dados en la figura 4.15a. Cuanto mayor sea la temperatura o más largo sea el tiempo, una mayor cantidad de austenita se transformará en perlita. Observe que, para cada temperatura, hay un tiempo mínimo para que comience la transformación. Este periodo define la velocidad crítica de enfriamiento; con tiempos más largos, la austenita empieza a transformarse en perlita según puede rastrearse en las figuras 4.15b y c.

Los diagramas TTT mostrados permiten realizar el diseño de programas de tratamiento térmico para obtener microestructuras deseables. Por ejemplo, considere las curvas TTT mostradas en la figura 4.15c; el acero puede elevarse a una temperatura muy alta (por encima de la temperatura eutéctica) para iniciar con un estado de austenita. Si el material se enfría rápidamente, puede seguir la trayectoria de la velocidad de enfriamiento de 140 °C/s que se muestra en la figura, lo que da como resultado 100% de martensita. Por otro lado, puede enfriarse más lentamente (en un baño de sal fundida) para desarrollar aceros que contengan perlita o bainita. Si se desea martensita revenida, el tratamiento térmico y las etapas de enfriamiento van seguidos por un proceso de revenido. En la figura 4.16 se muestran las diferencias en la dureza y la tenacidad de las diversas estructuras obtenidas. La perlita fina es más dura y menos dúctil que la perlita gruesa. Los efectos de los diversos porcentajes de carbono, cementita y perlita sobre otras propiedades mecánicas de los aceros se muestran en la figura 4.17.

4.8 Templabilidad de aleaciones ferrosas

La capacidad que tiene una aleación de ser endurecida por tratamiento térmico se llama **templabilidad**, la cual es una medida de la *profundidad* de la dureza que puede obtenerse mediante calentamiento y un temple subsecuente. El término “templabilidad” no debe confundirse con “dureza”, que es la resistencia de un material a ser indentado o ser raspado (sección 2.6). A partir del análisis realizado hasta el momento, puede verse que la templabilidad de las aleaciones ferrosas depende de (a) el contenido de carbono, (b) el tamaño de grano de la austenita, (c) los elementos de aleación presentes en el material y (d) la velocidad de enfriamiento.

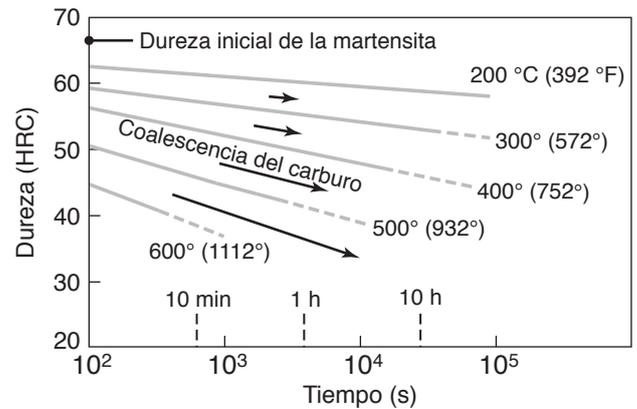


FIGURA 4.14 Dureza de la martensita revenida como una función del tiempo de revenido para el acero templado 1080 hasta 65 HRC. La dureza disminuye porque las partículas de carburo se unen y crecen en tamaño, aumentando de este modo la distancia entre partículas de la ferrita más blanda.

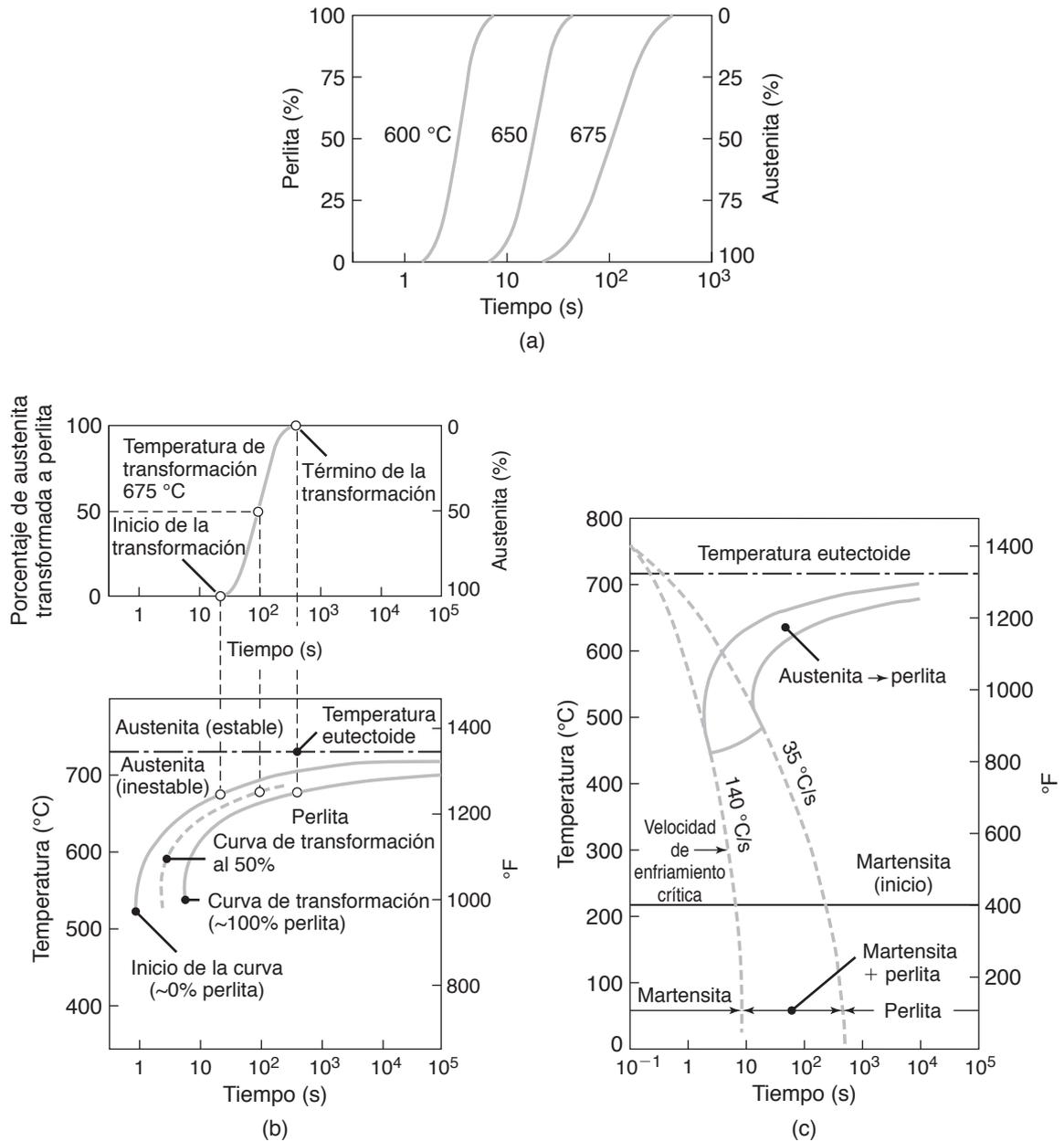


FIGURA 4.15 (a) Transformación de austenita a perlita de la aleación de hierro-carbono como una función del tiempo y la temperatura. (b) Diagrama de transformación isotérmica obtenida a partir de (a) para una temperatura de transformación de 675 °C (1247 °F). (c) Microestructuras obtenidas para una aleación de hierro-carbono eutécticoide como una función de la velocidad de enfriamiento.

4.8.1 Prueba de endurecimiento por temple diferencial

En esta **prueba Jominy** (en honor del metalúrgico estadounidense W. E. Jominy, 1893-1976) que se utiliza con frecuencia, una barra de pruebas redonda con longitud de 100 mm (4 pulg), fabricada a partir de una aleación particular, se **austenitiza**; es decir, se calienta a la temperatura adecuada para formar austenita al 100%. Después se temple directamente en un extremo (figura 4.18a) con un chorro de agua a 24 °C (75 °F). Así, la velocidad de enfriamiento varía a lo largo de la longitud de la barra que se encuentra en contacto directo con el agua, la velocidad más alta se presenta en el extremo inferior.

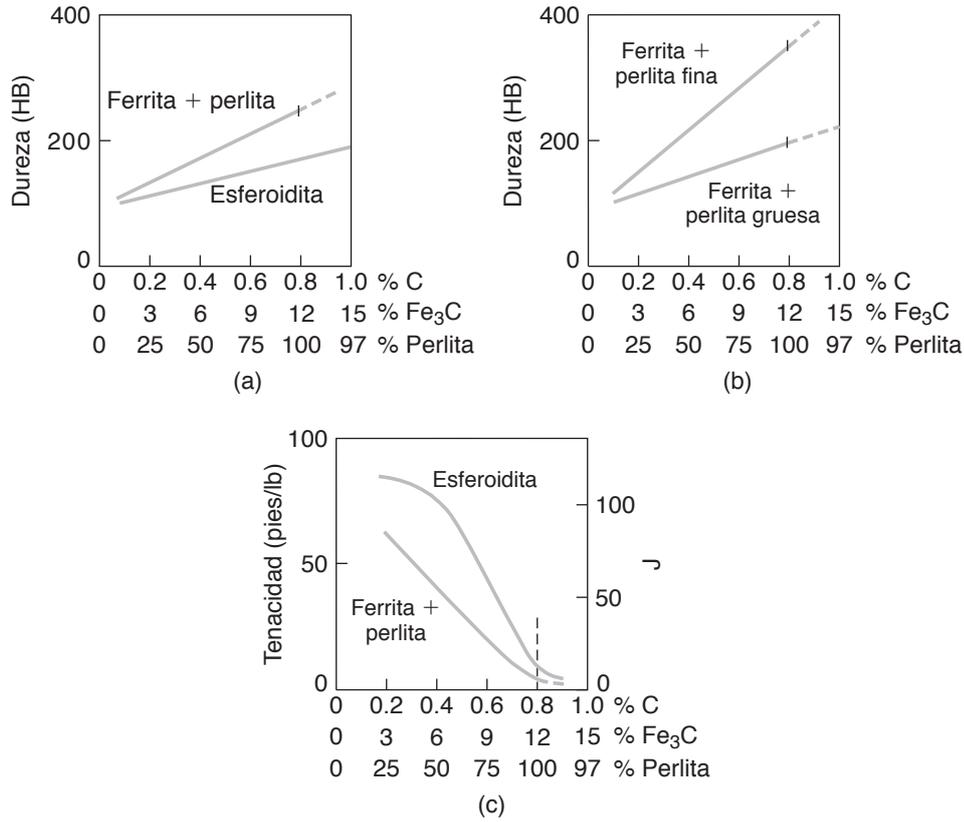


FIGURA 4.16 (a) y (b) Dureza y (c) tenacidad de los aceros al carbono recocidos como una función de la forma del carburo. En la perlita los carburos son laminares. La perlita fina se obtiene al aumentar la velocidad de enfriamiento. La estructura de la esferoidita tiene partículas de carburo del tipo esférico.

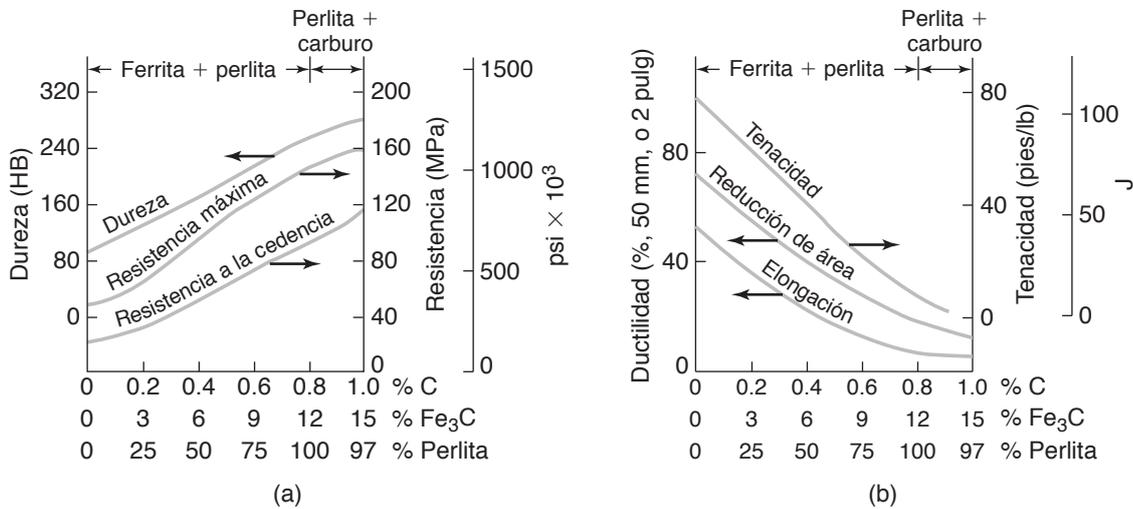


FIGURA 4.17 Propiedades mecánicas de los aceros recocidos como una función de la composición y la microestructura. Observe en (a) el incremento de la dureza y la resistencia y en (b) la disminución de la ductilidad y la tenacidad, con el aumento en las cantidades de perlita y carburo de hierro.

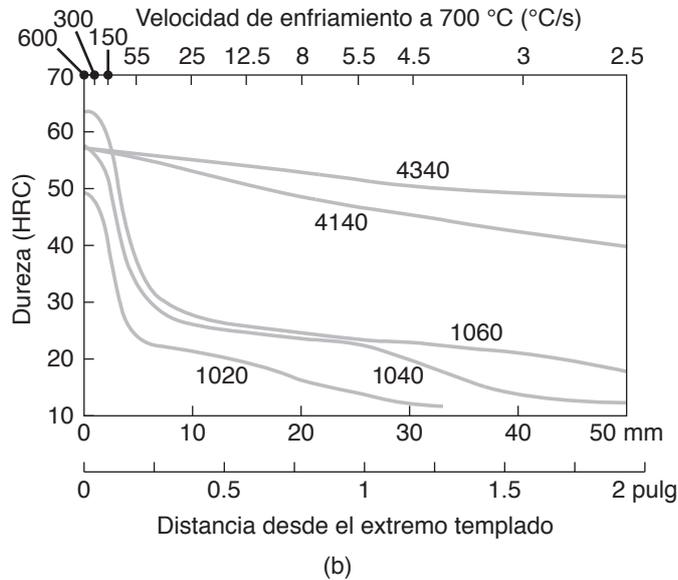
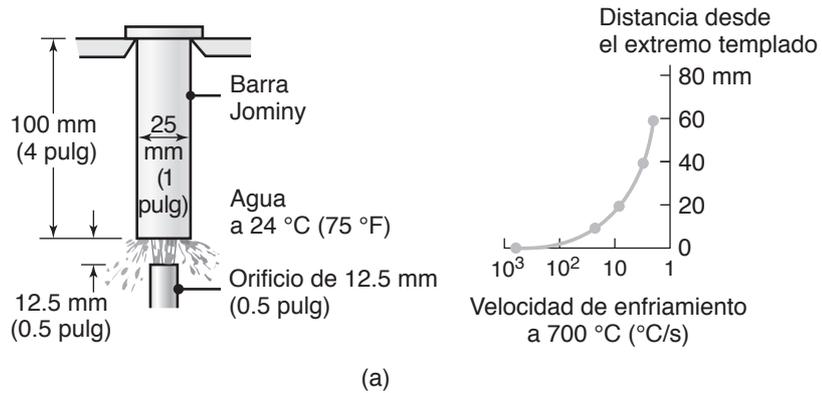


FIGURA 4.18 (a) Prueba de templado diferencial y velocidad de enfriamiento. (b) Curvas de templabilidad para cinco aceros diferentes, según se obtuvieron en la prueba de templado diferencial. Pequeñas variaciones en la composición pueden cambiar la forma de estas curvas. Cada curva es en realidad una banda y su determinación exacta es importante en el tratamiento térmico de metales para tener un mejor control de sus propiedades.

Enseguida, se mide la dureza a lo largo de la longitud de la barra a diferentes distancias desde el extremo templado.

Como era de esperarse a partir del análisis de los efectos de las velocidades de enfriamiento vistos en la sección 4.7, la dureza disminuye a partir del extremo templado de la barra (figura 4.18b). Entre mayor sea la profundidad a la cual aumenta la dureza, mayor será la templabilidad de la aleación. Cada composición de una aleación tiene su banda de **templabilidad particular**. Observe que en el extremo templado la dureza aumenta conforme es mayor el contenido de carbono y que los aceros 1040, 4140 y 4340 tienen el mismo contenido de carbono (0.40%); por lo tanto, tienen la misma dureza (57 HRC) en el extremo templado.



Código QR 4.2 Bolas de endurecimiento y templado con calentamiento por inducción. (Fuente: Cortesía de GH Induction Atmospheres).

4.8.2 Medios de temple

El fluido utilizado para templar la muestra calentada también tiene un efecto sobre la templabilidad. El templado puede llevarse a cabo en agua, salmuera (agua salada), aceite, sal fundida o al aire; en soluciones cáusticas o soluciones poliméricas; también pueden

usarse gases. Debido a las diferencias en la conductividad térmica —el calor específico y el calor de vaporización de los medios de templado—, la velocidad de enfriamiento de la muestra (la **severidad del templado**) también es distinta. En términos relativos y en orden decreciente, las capacidades de enfriamiento de varios de estos medios son: salmuera agitada, 5; agua sin agitar, 1; aceite sin agitar, 0.3; gas frío, 0.1; y aire calmado, 0.02.

La *agitación* también es un factor importante en la velocidad de enfriamiento; entre más vigorosa sea la agitación, mayor será la velocidad de enfriamiento. En aceros para herramientas, el medio de enfriamiento se especifica mediante una letra (vea la tabla 5.7), por ejemplo, W para el endurecimiento en agua, O para el endurecimiento en aceite y A para el endurecimiento al aire. La velocidad de enfriamiento depende también de la relación del área superficial sobre el espesor o del área superficial sobre el volumen de la pieza que debe templarse; cuanto mayor sea esta relación, mayor será la velocidad de enfriamiento. Por ejemplo, una placa gruesa se enfría más lentamente que una placa delgada con la misma área superficial. Estas consideraciones también son significativas durante el enfriamiento de metales y plásticos en los procesos de fundición y moldeo (secciones 10.5.1 y 19.3).

El agua es un medio común utilizado para el enfriamiento rápido. Sin embargo, la muestra calentada puede formar una **capa de vapor** a lo largo de sus superficies debido a las burbujas de vapor de agua que se forman cuando el agua hierve en la interfase del metal con el agua. Esta capa crea una barrera para la conducción de calor debido a la menor conductividad térmica del vapor. La agitación del fluido o de la pieza ayuda a reducir o eliminar dicha capa; asimismo, el agua puede rociarse a alta presión sobre la pieza. La salmuera es un medio de enfriamiento efectivo puesto que la sal ayuda a nuclear las burbujas en las interfases, lo que mejora la agitación; sin embargo, tenga en cuenta que la salmuera puede corroer la pieza.

Tanto en las aleaciones ferrosas como en las no ferrosas, es posible usar **medios de temple poliméricos**; éstos tienen características de enfriamiento que suelen estar entre las del agua y las de los aceites del petróleo. Los medios de temple poliméricos típicos son el alcohol de polivinilo, el óxido polialcalino, el pirrolideno de polivinilo y el polietilo oxazolina. Estos medios de temple tienen como ventajas un mejor control de la dureza, la eliminación de humo y fuego (como puede ocurrir cuando se utilizan aceites para el templado) y la reducción de la corrosión (como puede ocurrir cuando se utiliza el agua).

4.9 Tratamiento térmico de aleaciones no ferrosas y aceros inoxidables

Las aleaciones no ferrosas y algunos aceros inoxidables no pueden tratarse térmicamente mediante las técnicas descritas para las aleaciones ferrosas. La razón es que las aleaciones no ferrosas no experimentan transformaciones de fase como las de los aceros; los mecanismos de endurecimiento y de resistencia para estas aleaciones son fundamentalmente diferentes. Las aleaciones de aluminio, las aleaciones de cobre y las martensíticas, así como algunos otros aceros inoxidables tratables térmicamente, se endurecen y mejoran su resistencia mediante un proceso llamado **endurecimiento por precipitación**. En este proceso, pequeñas partículas de una fase diferente, llamadas **precipitados**, se dispersan uniformemente en la matriz de la fase original (figura 4.3a). Los precipitados se forman porque se excede la solubilidad en estado sólido de un elemento (un componente de la aleación) en el otro.

El endurecimiento por precipitación implica tres etapas, las cuales pueden describirse de mejor manera haciendo referencia al diagrama de fase utilizado para el sistema de aluminio-cobre (figura 4.19a). Para una composición de 95.5% Al-4.5% Cu, existe una solución sólida de una fase (fase kappa) por sustitución de cobre (soluto) en aluminio (solvente) entre 500 y 570 °C (930 y 1060 °F). Esta *fase kappa* es rica en aluminio, tiene una estructura fcc y es dúctil. Por debajo de la temperatura inferior (es decir, por debajo de la curva de solubilidad inferior) hay dos fases: *kappa* (κ) y *theta* (θ), esta última es un compuesto intermetálico duro de CuAl₂. Esta aleación puede tratarse térmicamente y sus propiedades se modifican mediante dos métodos diferentes: *tratamiento por solubilización* y *endurecimiento por precipitación*.

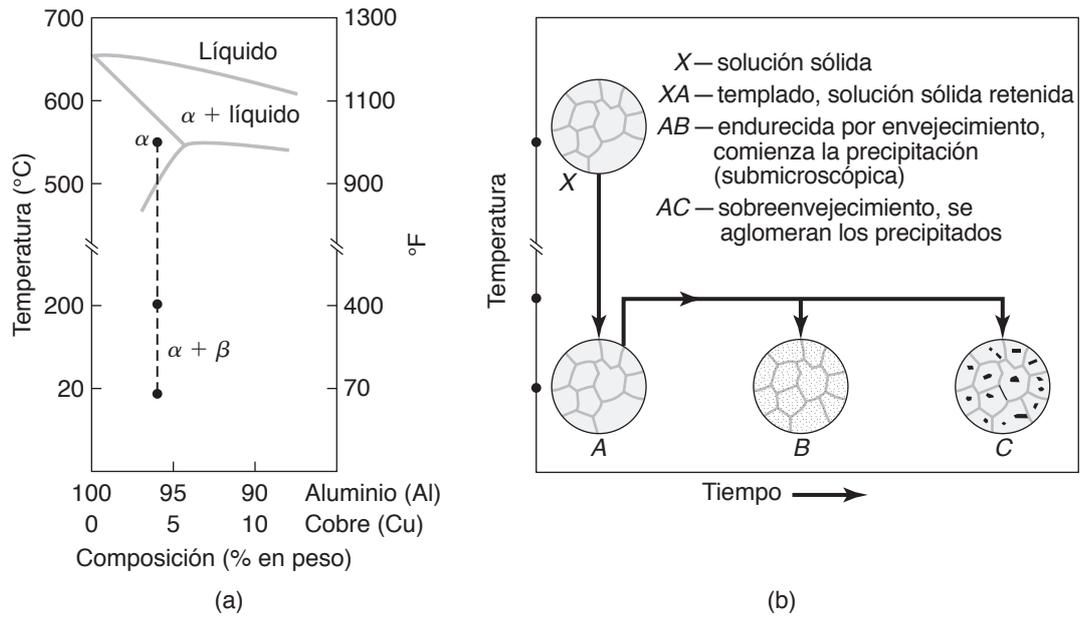


FIGURA 4.19 (a) Diagrama de fase para el sistema de aleación de aluminio-cobre. (b) Se obtienen diversas microestructuras durante el proceso de endurecimiento por envejecimiento.

4.9.1 Tratamiento por solubilización

En el *tratamiento por solubilización*, la aleación se calienta hasta dentro de la fase kappa de solución sólida (digamos, a 540 °C; 1000 °F) y después se enfría rápidamente, por ejemplo mediante templado en agua. La estructura obtenida después del temple (A en la figura 4.19b) se compone sólo de la fase kappa. Esta aleación tiene una resistencia moderada y una ductilidad considerable.

4.9.2 Endurecimiento por precipitación

La estructura obtenida en A en la figura 4.19b puede hacerse más resistente mediante el *endurecimiento por precipitación*. En este proceso, la aleación se recalienta primero a una temperatura intermedia y después se mantiene allí por un periodo determinado, durante el cual tiene lugar la precipitación. Los átomos de cobre se difunden a sitios de nucleación y se combinan con los átomos de aluminio. Este proceso produce la fase theta, la cual se forma como precipitados submicroscópicos (que se muestran en B mediante los pequeños puntos ubicados dentro de los granos de la fase kappa). La estructura resultante es más resistente que en A, aunque menos dúctil. El aumento en la resistencia mecánica se debe a una mayor oposición al movimiento de las dislocaciones en la región de los precipitados.

Envejecimiento. Debido a que el proceso de precipitación ocurre con el transcurso del tiempo y con la temperatura, también se denomina **envejecimiento**, y la mejora de propiedades se conoce como endurecimiento por envejecimiento. Si el proceso tiene lugar por encima de la temperatura ambiente, se le llama **envejecimiento artificial**. Varias aleaciones de aluminio se endurecen y se vuelven más resistentes a lo largo de un periodo determinado a temperatura ambiente; a este proceso se le llama **envejecimiento natural**. Tales aleaciones se templan primero y después, si se desea, se conforman mediante deformación plástica a temperatura ambiente. Por último, se deja que desarrollen resistencia y dureza mediante envejecimiento natural. La velocidad de envejecimiento natural puede frenarse mediante la refrigeración de la aleación templada (**tratamiento criogénico**).

En el proceso de precipitación, si la aleación recalientada se mantiene a una temperatura elevada durante un periodo prolongado, los precipitados inician su coalescencia y

crecimiento. Llegan a ser más grandes, pero menores en número, como lo muestran los puntos más grandes ubicados en C en la figura 4.19b. Este proceso se denomina **sobreenvejecimiento** y la aleación resultante es más blanda y débil.

En el proceso de envejecimiento existe una relación óptima de tiempo-temperatura que debe cumplirse con el fin de obtener las propiedades deseadas (figura 4.20). Es evidente que una aleación envejecida sólo puede ser usada en servicio hasta cierta temperatura máxima, de lo contrario sobreenvejecerá y perderá su resistencia y su dureza. Aunque más débil, una pieza sobreenvejecida tiene mejor estabilidad dimensional.

Maraging. Éste es un tratamiento de endurecimiento por precipitación para un grupo especial de aleaciones con alta resistencia a base de hierro. La palabra *maraging* se deriva de *martensite age hardening*, o *tratamiento martensítico envejecible*, un proceso en el que se precipitan uno o más compuestos intermetálicos en una matriz de martensita al bajo carbono. Un acero martensítico envejecible típico puede contener 18% de Ni, además de otros elementos, y el envejecimiento se lleva a cabo a 480 °C (900 °F). Debido a que el endurecimiento por maraging no depende de la velocidad de enfriamiento, es posible obtener una dureza uniforme y completa en piezas de grandes dimensiones y con una distorsión mínima. Los usos típicos de los aceros martensíticos envejecibles se dan en dados y herramientas para fundición, moldeo, forjado y extruido (partes II y III de este libro).

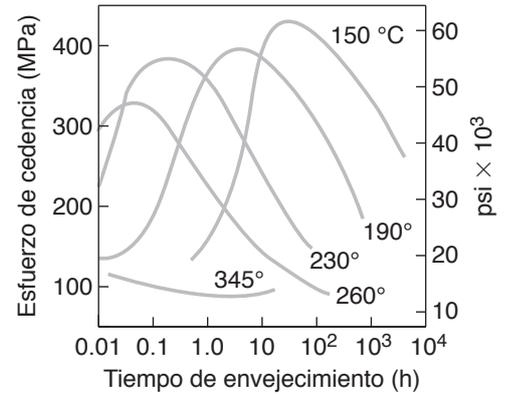


FIGURA 4.20 Efecto del tiempo de envejecimiento y de la temperatura sobre el esfuerzo de cedencia (o fluencia) de la aleación de aluminio 2014-T4; observe que, para cada temperatura, hay un tiempo de envejecimiento óptimo con el fin de obtener la resistencia máxima.

4.10 Endurecimiento superficial

Los procesos de tratamiento térmico descritos hasta ahora implican alteraciones microestructurales y cambios en las propiedades del volumen del componente por medio de una *endurecimiento de su masa total*. No siempre es deseable endurecer por completo las piezas porque una pieza dura carece de la tenacidad requerida para algunas aplicaciones. Por ejemplo, una pequeña grieta superficial podría propagarse rápidamente a través de una pieza y causar su falla repentina y total. En muchos casos, es deseable modificar solamente las *propiedades superficiales* de una pieza (de ahí el término *endurecimiento superficial*). Este ampliamente utilizado método resulta muy útil para mejorar la resistencia a indentación superficial, la fatiga y el desgaste en las superficies. Las aplicaciones típicas del endurecimiento superficial tienen lugar en dientes de engranes, levas, ejes, cojinetes, tornillos, clavos, discos de embrague para automóviles, herramientas y dados.

Existen varios procesos de endurecimiento superficial (tabla 4.1):

1. Carburizado (o carburado) (carburizado por gas, líquido y en caja).
2. Carbonitrurado.
3. Cianurado.
4. Nitrurado.
5. Borurado.
6. Endurecimiento por flama.
7. Endurecimiento por inducción.
8. Endurecimiento por rayo láser.

Básicamente, éstas son operaciones en las que el componente se calienta en una atmósfera que contiene elementos (como carbono, nitrógeno o boro) que alteran la composición, la microestructura y las propiedades de las capas superficiales. Para los aceros con un contenido suficientemente alto de carbono, el endurecimiento superficial se lleva a cabo sin usar ninguno de estos elementos adicionales; sólo se requieren los procesos de tratamiento térmico descritos en la sección 4.7 para alterar las microestructuras, generalmente por medio de endurecimiento por flama o por inducción, tal como se indica en la tabla 4.1.

TABLA 4.1

Esquema de los procesos de tratamiento térmico utilizados para el endurecimiento superficial					
Proceso	Metales endurecidos	Elemento añadido a la superficie	Procedimiento	Características generales	Aplicaciones típicas
Carburizado	Acero al bajo carbono (0.2% de C), aleaciones de acero (de 0.08 a 0.2% de C)	C	Calentar el acero a 870-950 °C (1600-1750 °F) en una atmósfera de gases carbonáceos (gas carburante) o sólidos que contengan carbono (carburizado en caja); después templar.	Se produce una superficie dura, con alto contenido de carbono. Dureza = 55-65 HRC. Profundidad de la capa = <0.5-1.5 mm (<0.020-0.060 pulg); cierta distorsión de la pieza durante el tratamiento térmico.	Engranés, levas, ejes, cojinetes, uniones de pistón, catarinas, discos de embrague.
Carbonitrurado	Acero al bajo carbono	C y N	Calentar el acero a 700-800 °C (1300-1600 °F) en una atmósfera de gases carbónicos y amoníaco; después, templar al aceite.	Dureza superficial = 55-62 HRC. Profundidad de la capa = 0.07-0.5 mm (0.003-0.020 pulg); menos distorsión que en el carburizado.	Pernos, tuercas, engranes.
Cianurado	Acero al bajo carbono (0.2% de C), aleaciones de acero (de 0.08 a 0.2% de C)	C y N	Calentar el acero a 760-845 °C (1400-1550 °F) en un baño fundido de soluciones de cianuro (por ejemplo, 30% de cianuro de sodio) y otras sales.	Dureza superficial de hasta 65 HRC. Profundidad de la capa = 0.025-0.25 mm (0.001-0.010 pulg); cierta distorsión.	Pernos, tuercas, tornillos, engranes pequeños.
Nitrurado	Aceros (1% de Al, 1.5% de Cr, 0.3% de Mo), aleaciones de acero (Cr, Mo), aceros inoxidable, aceros para herramientas de alta velocidad	N	Calentar el acero a 500-600 °C (925-1100 °F) en una atmósfera de gas amoníaco o una mezcla de sales de cianuro fundidas; no se requiere tratamiento adicional.	Dureza superficial de hasta 1100 HV. Profundidad de la capa = 0.1-0.6 mm (0.005-0.030 pulg) y 0.02-0.07 mm (0.001-0.003 pulg) para el acero de alta velocidad.	Engranés, ejes, catarinas, válvulas, cortadores, barras perforadas, piezas para bombas de inyección de combustible.
Borurado	Aceros	B	La parte se calienta usando un gas o un sólido que contenga boro o sólido en contacto con la pieza.	Superficie extremadamente dura y resistente al desgaste. Profundidad de la capa = 0.025-0.075 mm (0.001-0.003 pulg).	Aceros para herramientas y dados.
Endurecimiento por flama	Aceros medio carbono, hierros fundidos	Ninguno	La superficie se calienta con una llama de oxiacetileno, después se temple mediante aspersión de agua u otros métodos de temple.	Dureza superficial = 50-60 HRC. Profundidad de la capa = 0.7-6 mm (0.030-0.25 pulg); poca distorsión.	Engranés y dientes de catarinas, flechas, cigüeñales, bielas, bancadas y contrapuntos de torno.
Endurecimiento por inducción	Igual que el anterior	Ninguno	La pieza metálica se coloca en bobinas de inducción de cobre y se calienta mediante una corriente de alta frecuencia, después se temple.	Igual que el anterior.	Igual que el anterior.

Los rayos láser y los haces de electrones (secciones 27.6 y 27.7) se utilizan efectivamente para endurecer superficies pequeñas o grandes, tales como engranes, válvulas, punzones y cilindros de motor. Por lo general, la profundidad de la capa endurecida es menor a 2.5 mm (0.1 pulg). Estos métodos también se utilizan para el endurecimiento completo de piezas relativamente pequeñas. Las principales ventajas del endurecimiento superficial por rayo láser son un control estricto de la entrada de energía, una baja distorsión de la pieza y la capacidad de llegar a áreas que pueden ser inaccesibles para otros medios.

Debido a que el endurecimiento superficial consiste en una capa localizada, las piezas con superficie endurecida tienen un *gradiente de dureza*. Típicamente, la dureza es máxima en la superficie y disminuye hacia el interior, la tasa de disminución depende de las variables de composición y de las propiedades físicas del metal y del procesamiento. Las técnicas de endurecimiento superficial también pueden utilizarse para el *revenido* (sección 4.11) y para modificar las propiedades de las superficies que han sido sometidas a un tratamiento térmico. En la sección 34.2 se describen otros procesos y técnicas para el endurecimiento superficial, como el granallado y el laminado superficial, utilizadas para mejorar la resistencia al desgaste y otras características.

La **descarburización** es un fenómeno en el que las aleaciones pierden carbono en sus superficies como resultado del tratamiento térmico o del trabajo en caliente en un medio, generalmente oxígeno, que reacciona con el carbono. La descarburización es indeseable debido a que afecta la templabilidad de las superficies de una pieza al reducirse su contenido de carbono; también afecta negativamente a la dureza, el reforzamiento y la resistencia a la fatiga de los aceros, disminuyendo significativamente su límite de resistencia.

4.11 Recocido

Recocido es un término general usado para describir la restauración de una aleación trabajada en frío, o tratada térmicamente, a sus propiedades originales; por ejemplo, para aumentar su ductilidad (y por lo tanto su formabilidad) y para reducir su dureza y fuerza, o bien para modificar la microestructura de la aleación. El proceso de recocido también se usa para mitigar los esfuerzos residuales en una pieza y para mejorar su maquinabilidad y estabilidad dimensional. El término “recocido” también se aplica al tratamiento térmico del vidrio y de productos similares (sección 18.4), piezas de fundición y piezas soldadas.

El proceso de recocido consiste en los siguientes pasos:

1. Calentar la pieza de trabajo a una temperatura específica en un horno.
2. Mantener esa temperatura durante un periodo determinado (empapado).
3. Enfriar la pieza de trabajo, al aire o en un horno.

El proceso de recocido puede llevarse a cabo en una atmósfera inerte o controlada, o bien puede realizarse a temperaturas más bajas para reducir al mínimo o evitar la oxidación de la superficie.

La *temperatura de recocido* puede ser mayor que la temperatura de recristalización del material, dependiendo del grado de trabajo en frío. Por ejemplo, la temperatura de recristalización para el cobre está entre 200 y 300 °C (400 y 600 °F), mientras que la temperatura de recocido requerida para recuperar completamente sus propiedades originales se encuentra entre 260 y 650 °C (500 y 1200 °F), dependiendo del grado de trabajo en frío previo (vea también la sección 1.7).

El **recocido total** es un término que se aplica a las aleaciones ferrosas. El acero se calienta por encima de A_1 o A_3 (figura 4.21) y el enfriamiento se lleva a cabo en forma lenta [típicamente a 10 °C (20 °F) por hora] en un horno, después de lo cual se apaga. La estructura obtenida mediante el recocido total es perlita gruesa, que es blanda y dúctil y tiene granos pequeños y uniformes.

Para evitar un ablandamiento excesivo debido al recocido de los aceros, el ciclo de enfriamiento puede realizarse completamente en aire calmado o quieto. A este proceso se

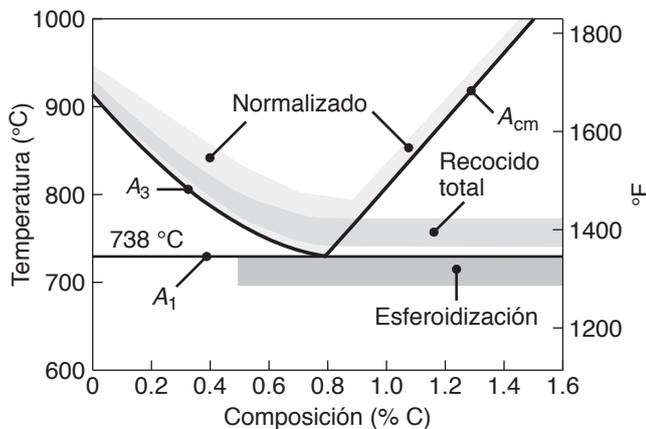


FIGURA 4.21 Rangos de temperatura del tratamiento térmico para los aceros al carbono, según lo indica el diagrama de fase de hierro-carburo de hierro.

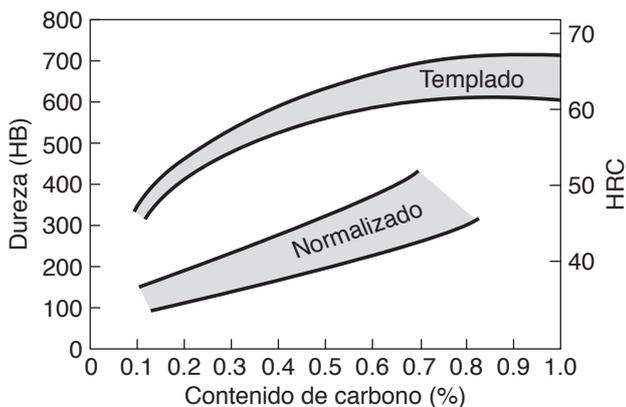


FIGURA 4.22 Dureza de los aceros en las condiciones de templado y normalizado como una función del contenido de carbono.

le llama **normalizado** para indicar que la pieza se calienta a una temperatura por encima de A_3 o A_{cm} con el fin de transformar la estructura a austenita. El normalizado resulta en una resistencia y dureza algo mayores y en una ductilidad menor que las resultantes del recocido completo (figura 4.22). La estructura obtenida es perlita fina, con granos pequeños y uniformes. Por lo general, el normalizado se lleva a cabo para refinar la estructura del grano, obtener una estructura uniforme (homogeneización), disminuir los esfuerzos residuales y mejorar la maquinabilidad.

La estructura esferoidal y el procedimiento para su obtención se describen en la sección 4.7 y se muestran en las figuras 4.12 y 4.21. El *recocido por esferoidización* mejora la capacidad de trabajar en frío (sección 14.5) y la maquinabilidad de los aceros (sección 21.7).

Recocido de alivio de esfuerzos. Para reducir o eliminar los esfuerzos residuales, una pieza de trabajo se somete generalmente a un *recocido de alivio de esfuerzos*, o de **relevado de esfuerzos**. La temperatura y el tiempo requeridos para realizar este proceso dependen del material y de la magnitud de los esfuerzos residuales presentes. Los esfuerzos residuales pueden ser inducidos durante el formado o el maquinado, o bien ser causados por los cambios de volumen durante las transformaciones de fase.

Revenido. Si los aceros se endurecen por tratamiento térmico, el *revenido* (**temple regulado**, en inglés **drawing**) se utiliza con el propósito de reducir la fragilidad, aumentar la ductilidad y la tenacidad y reducir los esfuerzos residuales. El término “revenido” también se utiliza para los vidrios. En el revenido, el acero se calienta a una temperatura específica, dependiendo de su composición, y después se enfría a una velocidad prescrita. En la figura 4.23 se muestran los resultados del revenido para un acero AISI 4340 templado en aceite.

Los aceros de aleación pueden experimentar **fragilización por revenido**, que es causada por la segregación de impurezas a lo largo de los límites de grano, a temperaturas de entre 480 y 590 °C (900 y 1100 °F).

Bainitizado. En el *bainitizado* (o *ausrevenido*), el acero calentado se enfría rápidamente desde la temperatura de austenización para evitar la formación de ferrita o perlita. Se mantiene a cierta temperatura hasta que se completa la transformación isotérmica de austenita en bainita. Después se enfría a temperatura ambiente, por lo general en aire calmado y a una velocidad moderada con el fin de evitar gradientes térmicos dentro de la pieza. El medio de temple que más se utiliza es la sal fundida, a temperaturas que van desde 160 hasta 750 °C (de 320 a 1380 °F).

Con frecuencia, el bainitizado se sustituye por el temple convencional y revenido, ya sea para reducir la tendencia al agrietamiento y la distorsión durante el templado o para mejorar la ductilidad y tenacidad al tiempo que se mantiene la dureza. Debido al ciclo de tiempo más corto involucrado, este proceso también es económico.

Templado interrumpido (marenfriado). En el *templado interrumpido* (también conocido como *martempering*), el acero o el hierro fundido se enfría primero desde la tempera-

tura de austenización en un medio fluido caliente, como aceite caliente o sal fundida. Después, se mantiene a esa temperatura hasta que ésta sea uniforme en toda la pieza. Se enfría a una velocidad moderada, por ejemplo al aire calmado, con el fin de evitar excesivos gradientes por temperatura dentro de la pieza. Por lo general, la pieza se revene posteriormente debido a que de otro modo la estructura obtenida es principalmente martensita no revenida y, por lo tanto, no resulta adecuada para la mayoría de las aplicaciones.

Los aceros marenfriados tienen una menor tendencia al agrietamiento, a la distorsión o al desarrollo de esfuerzos residuales durante el tratamiento térmico. En el **marenfriado modificado**, la temperatura de temple es menor y, por consiguiente, la velocidad de enfriamiento es mayor. El proceso es adecuado para los aceros con menor templabilidad.

Ausformado. En el *ausformado*, también llamado **procesamiento termomecánico**, el acero se forma con los perfiles deseados, dentro de rangos controlados de temperatura y tiempo para evitar la formación de productos de transformación no martensíticos. Después, la pieza se enfría a diferentes velocidades para obtener las microestructuras deseadas.

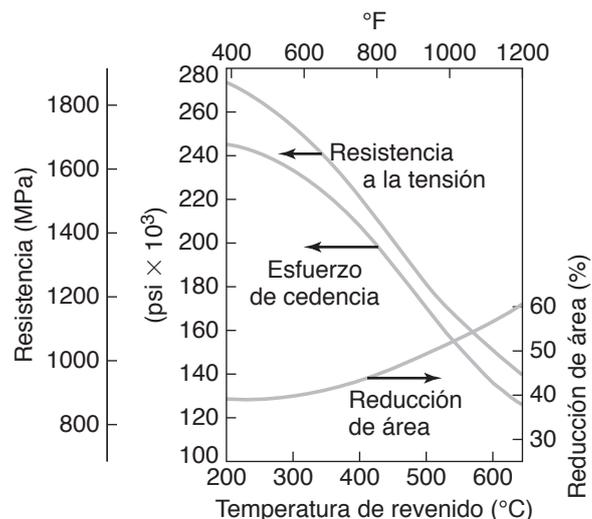


FIGURA 4.23 Propiedades mecánicas del acero 4340 templado en aceite como una función de la temperatura de revenido.

4.12 Hornos y equipo para el tratamiento térmico

Para realizar el tratamiento térmico se usan dos tipos básicos de hornos: hornos por lotes (o discontinuos) y hornos continuos. Debido a que consumen mucha energía, su aislamiento y eficacia son consideraciones importantes de diseño, así como lo son su costo inicial, el personal necesario para su operación y mantenimiento y su uso seguro.

La temperatura uniforme y el control preciso de los ciclos de tiempo-temperatura son importantes. Los hornos modernos están equipados con diferentes controles electrónicos, incluyendo sistemas controlados por computadora, programados para ejecutarse a través de un ciclo de tratamiento térmico completo repetible y reproducible con exactitud. Los combustibles que se utilizan son generalmente gas natural, petróleo o electricidad (para el calentamiento por resistencia o inducción); el tipo de combustible afecta la atmósfera del horno. Sin embargo, a diferencia del calentamiento eléctrico, el gas o el petróleo introducen productos de la combustión en el horno. Por su parte, el calentamiento eléctrico tiene un tiempo de arranque más lento y es más difícil de ajustar y controlar.

Hornos por lotes. En un *horno por lotes* (o *discontinuo*), las partes a ser tratadas térmicamente se cargan y descargan del horno en lotes individuales. El horno se compone básicamente de una cámara de aislamiento, un sistema de calentamiento y una o varias puertas de acceso. Los hornos por lotes pueden pertenecer a alguno de los siguientes tipos básicos:

1. Un **horno de caja** es una cámara rectangular horizontal, con una o dos puertas de acceso a través de las cuales se cargan las piezas.
2. Un **horno de fosa** es un pozo vertical por debajo del nivel del suelo dentro del cual se bajan las piezas.
3. Un **horno de campana** es un horno de caja redondo o rectangular sin fondo que se baja para cubrir las piezas apiladas que serán tratadas térmicamente; este tipo de horno es especialmente adecuado para bobinas de alambre, barras y láminas metálicas.
4. En un **horno de elevador**, las piezas a ser tratadas térmicamente se cargan sobre una plataforma móvil, se enrollan en su posición, y después se elevan hacia el horno.

Hornos continuos. En este tipo de horno, las piezas a tratar térmicamente se mueven continuamente a través del horno sobre transportadores diseñados de diversas maneras.

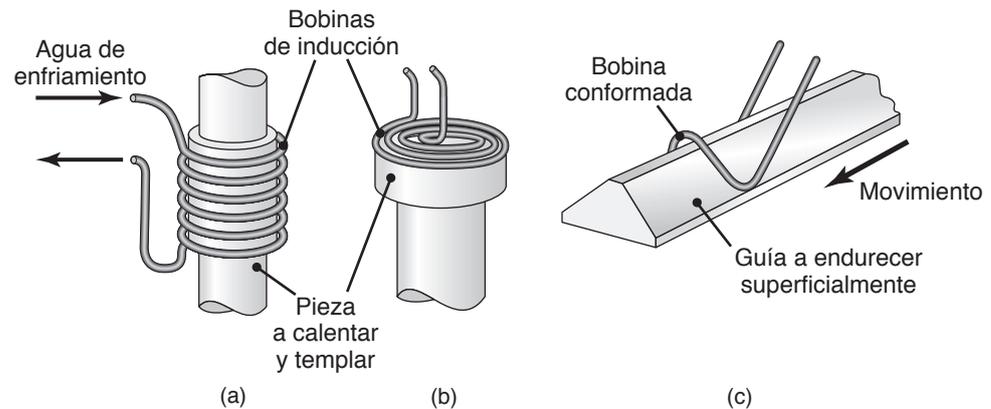


FIGURA 4.24 Tipos de bobinas utilizadas en el calentamiento por inducción de diferentes superficies de piezas.

Hornos de baño salino. Debido a sus altas velocidades de calentamiento y a su mejor control de la uniformidad de la temperatura, los *baños salinos* se usan comúnmente en diversas operaciones de tratamiento térmico, en particular para tiras y alambres no ferrosos. Las velocidades de calentamiento son altas debido a la mayor conductividad térmica de las sales líquidas en comparación con la conductividad del aire o de los gases.

Camas fluidizadas. Cierta cantidad de partículas sólidas sueltas, secas y finas, por lo general de óxido de aluminio, se calientan y suspenden en una cámara mediante un flujo ascendente de gas caliente a distintas velocidades. Las piezas a tratar térmicamente se colocan después en medio de las partículas flotantes, de ahí el término de *cama* o *lecho fluidizado*.

Calentamiento por inducción. En este método, la pieza se calienta rápidamente mediante el campo electromagnético generado por una *bobina de inducción* que lleva corriente alterna, la cual induce corrientes de eddy en la pieza. La bobina, que puede ser conformada para adaptarse al contorno de la pieza a tratar térmicamente (figura 4.24), está hecha de cobre o de una aleación a base de cobre. La bobina, que por lo general se enfría con agua, también puede diseñarse para templar la pieza.

Hornos de atmósfera controlada. En los hornos, las atmósferas pueden ser controladas con el fin de evitar la oxidación, el opacamiento y la descarburización de aleaciones de hierro calentadas a temperaturas elevadas. El oxígeno provoca corrosión, herrumbre y cascarilla. El dióxido de carbono, que tiene varios efectos, puede ser neutro o descarburizante, dependiendo de su concentración en la atmósfera del horno. El nitrógeno constituye un ambiente neutro común y el vacío proporciona un ambiente completamente neutro. En un horno, el vapor de agua provoca que los aceros se oxiden, lo que a su vez resulta en un color azuloso. El término **azulado** (o **pavonado**) se utiliza para describir la formación de una película delgada y azul de óxido sobre las piezas acabadas para mejorar su apariencia y su resistencia a la oxidación.



Código QR 4.3 Demostración del calentamiento por inducción. (Fuente: Cortesía de GH Induction Atmospheres).

4.13 Consideraciones de diseño para el tratamiento térmico

Además de los factores metalúrgicos, el éxito del tratamiento térmico implica consideraciones de diseño para evitar problemas tales como el agrietamiento, la distorsión y la falta de uniformidad en las propiedades a través de, y entre, las piezas tratadas térmicamente. La velocidad de enfriamiento durante el templado puede no ser uniforme, especialmente en formas complejas que tienen diferentes secciones transversales y espesores, lo que produce severos gradientes por temperatura en la pieza. La falta de uniformidad puede

conducir a variaciones en la contracción, lo que resulta en esfuerzos térmicos que pueden causar distorsión o agrietamiento de la pieza. El enfriamiento no uniforme también provoca esfuerzos residuales en la pieza, lo cual puede conducir al agrietamiento por corrosión-esfuerzo. El método de templado que se seleccione, el cuidado durante la operación, y la adecuada elección de un medio de enfriamiento y de la temperatura también son consideraciones importantes.

Como una guía general en el diseño de piezas para el tratamiento térmico, tome en cuenta lo siguiente:

- Deben evitarse las esquinas agudas internas o externas, de lo contrario los concentradores de esfuerzo en dichas esquinas pueden elevar el nivel de esfuerzo lo suficiente como para causar grietas.
- La pieza debe tener espesores tan uniformes como sea posible.
- La transición entre regiones de diferentes espesores debe hacerse poco a poco.
- El tratamiento térmico de piezas con orificios, ranuras, chaveteros y formas asimétricas puede resultar difícil porque pueden romperse durante el temple.
- Las superficies grandes con secciones delgadas pueden sufrir distorsión.
- Las piezas forjadas en caliente y los productos de acero fresados en caliente pueden tener una capa *descarburada* que no podrá responder exitosamente al tratamiento térmico.

RESUMEN

- Por lo general, los metales comercialmente puros no tienen suficiente resistencia para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería y, en consecuencia, deben alearse con diversos elementos que alteran sus estructuras y propiedades. En las aleaciones, la solubilidad de los elementos de aleación en un metal con mayor cantidad de átomos y las fases presentes en varios rangos de temperatura y composición son conceptos importantes.
- Las aleaciones tienen dos formas básicas: soluciones sólidas y compuestos intermetálicos. Las soluciones sólidas pueden ser sustitucionales o intersticiales. Hay ciertas condiciones relativas a la estructura cristalina y los radios atómicos que deben cumplirse con el fin de desarrollar estas estructuras.
- Los diagramas de fase muestran las relaciones que hay entre la temperatura, la composición y las fases presentes en un sistema de aleación particular. A medida que disminuye la temperatura a diversas velocidades, se llevan a cabo de manera correspondiente varias transformaciones, lo que resulta en microestructuras que tienen características y propiedades muy diferentes.
- Entre los sistemas binarios, el más importante es el sistema hierro-carbono, el cual incluye un amplio rango de aceros y hierros fundidos. Entre los componentes importantes de este sistema se encuentran la ferrita, la austenita y la cementita. Los tipos básicos de hierro fundido son hierro gris, hierro dúctil (nodular), hierro blanco, hierro maleable y hierro de grafito compactado.
- Los mecanismos de endurecimiento y reforzamiento de las aleaciones metálicas implican básicamente calentar la aleación y posteriormente templearla a diferentes velocidades de enfriamiento. Entonces ocurren importantes transformaciones de fase que producen estructuras tales como la perlita (fina o gruesa), la esferoidita, la bainita y la martensita. El tratamiento térmico de aleaciones no ferrosas y aceros inoxidable implica el tratamiento por solución y el endurecimiento por precipitación.
- La atmósfera del horno, los medios de temple utilizados, el control y las características de los equipos, junto con la forma de las piezas que se van a tratar térmicamente, son consideraciones importantes en el tratamiento térmico.
- La templabilidad es la capacidad de una aleación para ser endurecida mediante tratamiento térmico. La prueba de endurecimiento Jominy por templado diferencial es un método que se utiliza comúnmente para determinar las bandas de templabilidad en las aleaciones.

- El endurecimiento superficial es un proceso importante para mejorar la resistencia al desgaste y a la fatiga en las piezas. Existen varios métodos disponibles, como el carburizado o cementado, nitrurado, endurecimiento por inducción y endurecimiento por rayo láser.
- El recocido incluye el normalizado, el proceso de recocido, el alivio de esfuerzos, el revenido, el bainitizado y el templado interrumpido, cada uno de los cuales tiene el propósito de mejorar la ductilidad y la tenacidad de las piezas tratadas térmicamente.

TÉRMINOS CLAVE

Aleación	Endurecimiento por envejecimiento	Martensita	Sobreenvejecimiento
Austenita	Endurecimiento por precipitación	Martensita revenida	Solución sólida
Austenita retenida	Endurecimiento superficial	Metales puros	Soluto
Bainita	Ensayo de extremo templado	Normalizado	Solvente
Bainitizado	Ensayo o prueba Jominy	Perlita	Templabilidad
Cementita	Envejecimiento	Punto eutéctico	Temperatura Curie
Compuestos intermetálicos	Esferooidita o esferooidizado	Reacción eutectoide	Templado interrumpido
Descarburización	Ferrita	Recocido	Transformaciones de fase
Diagrama de equilibrio	Hierro fundido	Relevado de esfuerzos	Tratamiento por solución
Diagrama de fase binario	Hornos	Revenido	Tratamiento térmico
Diagramas de tiempo-temperatura-transformación	Maraging	Sistema de hierro y carbono	
Distorsión		Sistemas de dos fases o bifásicos	

BIBLIOGRAFÍA

- ASM Handbook, Vol. 3: Alloy Phase Diagrams, ASM International, 1992.
- ASM Handbook, Vol. 4: Heat Treating, ASM International, 1991.
- ASM Handbook, Vol. 9: Metallography and Microstructures, ASM International, 2004.
- Brooks, C. R., Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steel, ASM International, 1996.
- Bryson, W. E., Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels, 2a. ed., Hanser Gardner, 2005.
- Campbell, F. C., (ed.), Phase Diagrams: Understanding the Basics, ASM International, 2012.
- Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels, 2a. ed., ASM International, 1995.
- Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Nonferrous Alloys, ASM International, 1996.
- Krauss, G., Steels: Processing, Structure, and Performance, ASM International, 2005.
- Totten, G. E., Steel Heat Treatment Handbook, 2 vols., 2a. ed., CRC Press/Taylor & Francis, 2007.

PREGUNTAS DE REPASO

- 4.1 Describa la diferencia entre un soluto y un solvente.
- 4.2 ¿Qué es una solución sólida?
- 4.3 ¿Cuáles son las condiciones necesarias para obtener soluciones sólidas (a) sustitucionales y (b) intersticiales?
- 4.4 Describa la diferencia entre un sistema de una sola fase monofásico y otro de dos fases bifásico.
- 4.5 ¿Qué es un calentador de inducción? ¿Qué tipo de formas de pieza pueden calentarse mediante el calentamiento por inducción?
- 4.6 Describa las características principales de un diagrama de fase.
- 4.7 ¿Qué indican los términos “equilibrio” y “constitucional”, aplicados a los diagramas de fase?
- 4.8 ¿Cuál es la diferencia entre “eutéctica” y “eutectoide”?
- 4.9 ¿Qué es el revenido? ¿Por qué se realiza?
- 4.10 Explique lo que significa “severidad de temple”.
- 4.11 ¿Qué son los precipitados? ¿Por qué son importantes en el endurecimiento por precipitación?
- 4.12 ¿Cuál es la diferencia entre el envejecimiento natural y el artificial?
- 4.13 Describa las características de la ferrita, la austenita y la cementita.
- 4.14 ¿Cuál es el propósito del recocido?
- 4.15 ¿Qué es un diagrama de tiempo-temperatura-transformación? ¿Cómo se utiliza?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 4.16** Es posible que usted haya visto cierta literatura técnica sobre productos que informe que ciertas piezas de esos productos fueron “tratadas térmicamente”. Describa brevemente su comprensión de este término y por qué lo incluye el fabricante.
- 4.17** Describa la importancia ingenieril de la existencia de un punto eutéctico en los diagramas de fase.
- 4.18** ¿Cuál es la diferencia entre dureza y templabilidad?
- 4.19** Con referencia a la tabla 4.1, explique por qué los elementos que aparecen en las aplicaciones típicas son adecuados para el endurecimiento superficial.
- 4.20** Por lo general, no es deseable utilizar aceros en su condición de temple. Explique por qué.
- 4.21** Describa las diferencias entre el endurecimiento superficial y el endurecimiento total en su masa, en lo referente a las aplicaciones ingenieriles de los metales.
- 4.22** Describa las características de (a) una aleación, (b) la perlita, (c) la austenita, (d) la martensita y (e) la cementita.
- 4.23** Explique por qué el carbono, entre todos los elementos, es tan eficaz al dar resistencia al hierro en la forma de acero.
- 4.24** ¿Cómo afecta la forma del grafito a las propiedades del hierro fundido?
- 4.25** En la sección 4.8.2 se describen varios fluidos en términos de su capacidad de enfriamiento en el templado. ¿Qué propiedades físicas de estos fluidos influyen en su capacidad de enfriamiento?
- 4.26** ¿Por qué es importante conocer las características de los hornos para tratamiento térmico? Explique.
- 4.27** Explique por qué en la abscisa de la figura 4.16c, el porcentaje de perlita comienza a disminuir después de que se alcanza un contenido de carbono del 0.8 por ciento.
- 4.28** ¿Cuál es la importancia del descarburado? Proporcione algunos ejemplos.
- 4.29** Explique qué entiende usted por distorsión de tamaño y de forma en las piezas tratadas térmicamente y describa sus causas.
- 4.30** Comente sus observaciones en relación con la figura 4.18b.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

- 4.31** Diseñe un ciclo de tratamiento térmico para el acero al carbono, incluyendo la temperatura y los tiempos de exposición, cuyo fin sea producir (a) aceros de perlita-martensita y (b) aceros de bainita-martensita.
- 4.32** Utilizando la figura 4.4, estime las siguientes cantidades necesarias para producir una aleación 75% Cu-25% Ni: (a) temperatura del liquidus, (b) temperatura del solidus, (c) porcentaje de níquel en el líquido a 1150 °C (2102 °F), (d) la fase mayor a 1150 °C y (e) la relación de sólido a líquido a 1150 °C.
- 4.33** Mediante una extrapolación de las curvas de la figura 4.14, estime el tiempo necesario para que el acero 1080 se ablande hasta 40 HRC a (a) 300 °C y (b) 400 °C.
- 4.34** Un acero típico para tuberías es el AISI 1040 y uno para cuerdas musicales es el 1085. Teniendo en cuenta sus aplicaciones, explique la razón de la diferencia en el contenido de carbono.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

- 4.35** En este capítulo se estableció que, en el diseño de piezas, deben evitarse las esquinas agudas con el fin de reducir la tendencia al agrietamiento durante el tratamiento térmico. Si para una pieza resulta esencial tener esquinas agudas con propósitos funcionales, y aún así requiere tratamiento térmico, ¿qué método recomendaría usted para la fabricación de esta pieza?
- 4.36** Los procesos de tratamiento térmico para el endurecimiento superficial se resumen en la tabla 4.1. Cada uno de estos procesos implica diferentes equipos, procedimientos y tiempos de ciclo; como resultado, cada uno incurre en costos diferentes. Revise la literatura disponible, póngase en contacto con varias compañías y haga una tabla similar delineando los costos que ocurren en cada proceso.
- 4.37** Es posible observar que, como resultado del tratamiento térmico, las piezas pueden experimentar distorsiones de tamaño y forma en diversos grados. Con base en la bibliografía listada al final de este capítulo, haga una revisión de la literatura técnica y reporte datos cuantitativos con respecto a las distorsiones de piezas con diferentes formas.
- 4.38** En la figura 4.18b se muestran las distribuciones de dureza en pruebas de temple diferencial como fueron medidas a lo largo de una barra redonda. Haga un esquema cualitativo simple que muestre la distribución de la dureza a través del diámetro de la barra. ¿La forma de la curva depende del contenido de carbono en la barra? Explique su respuesta.
- 4.39** A lo largo de este capítulo se han visto ejemplos concretos de la importancia y los beneficios de piezas, o de ciertas regiones de piezas, tratadas térmicamente. Con base en la bibliografía listada al final del capítulo, haga una revisión de la literatura sobre tratamiento térmico y compile varios ejemplos e ilustraciones de piezas que hayan sido tratadas térmicamente.
- 4.40** Con base en la figura 4.24, piense en una variedad de otras formas de pieza a tratarse térmicamente y diseñe bobinas que sean apropiadas para estas formas. Describa qué tan diferentes serían sus diseños si las piezas tuvieran formas variables a lo largo de su longitud (por ejemplo, una forma cuadrada en un extremo y redonda en el otro).
- 4.41** Inspeccione varias piezas en su automóvil u hogar e identifique aquellas que posiblemente hayan sido endurecidas por tratamiento térmico. Explique las razones de su elección.

Aleaciones y los metales ferrosos: producción, propiedades generales y aplicaciones

5.1	Introducción	128
5.2	Producción de hierro y acero	129
5.3	Vaciado de lingotes	132
5.4	Fundición continua	133
5.5	Aceros al carbono y aleados	135
5.6	Aceros inoxidables	142
5.7	Aceros para herramientas y dados	144

CASOS DE ESTUDIO:

5.1	Aceros avanzados de alta resistencia en automóviles	142
5.2	Aceros inoxidables en automóviles	144

- Las aleaciones y los metales ferrosos son los materiales estructurales más utilizados, generalmente debido a sus propiedades y desempeño, facilidad de manufactura y bajo costo.
- El capítulo inicia con una breve reseña sobre la producción del hierro y del acero a partir de mineral de hierro, incluyendo descripciones de los hornos y de las operaciones de fundición.
- Se describen el vaciado de lingotes y las operaciones de fundición continua, las cuales se usan en la actualidad de manera amplia para la producción de metales de alta calidad en grandes volúmenes.
- Posteriormente, en este mismo capítulo se analizan con detalle las propiedades y aplicaciones de los metales ferrosos, incluyendo los hierros fundidos, los aceros al carbono y los aceros aleados, así como los aceros inoxidables y los aceros para herramientas y dados.

5.1 Introducción

En virtud de su costo relativamente bajo y de su amplio rango de propiedades mecánicas, físicas y químicas, las **aleaciones** y los **metales ferrosos** están entre los metales más útiles. Contienen hierro como su metal común y generalmente se clasifican como *aceros al carbono* y *aleados*, *aceros inoxidables*, *aceros para herramientas* y *dados*, *hierros fundidos* y *aceros fundidos*. Con el término **acero** se hace referencia a una aleación ferrosa que puede ser tan simple como una aleación de hierro y carbono, pero con frecuencia también contiene cierto número de elementos de aleación para impartirle diversas propiedades. Las aleaciones ferrosas se producen como:

- Lámina de acero para automóviles, aparatos domésticos y recipientes.
- Placas para calderas, barcos y puentes.
- Elementos estructurales como vigas en I, productos en barra, ejes, cigüeñales y rieles de ferrocarril.
- Herramientas, dados y moldes.
- Varillas y alambre para sujetadores como pernos, remaches, tuercas y grapas.

Los aceros al carbono son los menos costosos de todos los metales estructurales. Como un ejemplo de su uso generalizado, los metales ferrosos constituyen entre el 70 y el 85% del peso de todos los elementos estructurales y componentes mecánicos. En Estados Unidos, el vehículo de pasajeros promedio (incluyendo camiones y vehículos utilitarios deportivos) contiene cerca de 1200 kg (2700 lb) de acero, lo que representa alrededor de 60% de su peso total.

El uso de hierro y acero como materiales estructurales ha sido uno de los avances tecnológicos más importantes. Las herramientas ferrosas primitivas, que aparecieron por primera vez aproximadamente entre los años 4000 y 3000 a. C., estaban hechas de hierro

meteórico obtenido a partir de meteoritos que habían golpeado a la Tierra. El verdadero trabajo del hierro comenzó en Asia Menor en 1100 a. C., y marcó el advenimiento de la *Edad del Hierro*. La invención del alto horno aproximadamente en 1340 d. C., hizo posible la producción de grandes cantidades de hierro y acero de alta calidad (vea la tabla I.2).

5.2 Producción de hierro y acero

5.2.1 Materias primas

Los tres materiales básicos usados en la fabricación de hierro y acero son **mineral de hierro**, **piedra caliza** y **coque**. A pesar de que no se produce en estado libre en la naturaleza, el *hierro* es uno de los elementos más abundantes (en forma de diversos minerales) en el mundo, representa aproximadamente el 5% de la corteza terrestre. Los principales minerales de hierro son: (a) la *taconita* (una roca de pedernal negro), (b) la *hematita* (un mineral de óxido de hierro) y (c) la *limonita* (un óxido de hierro que contiene agua). Después de que se extrae, el mineral se tritura en partículas finas, se eliminan las impurezas (por diversos medios como la separación magnética) y el mineral se forma en pellets, esferoides o briquetas usando agua y diversos aglutinantes. Por lo general, alrededor del 65% de los pellets es de hierro puro y éstos tienen un diámetro aproximado de 25 mm (1 pulg). El mineral de hierro concentrado se conoce como *beneficiado* (de igual modo que otros minerales concentrados). Algunos minerales ricos en hierro se utilizan directamente sin pasar por la pelletización.

El *coque* se obtiene a partir de calidades especiales de carbón bituminoso (un carbón blando rico en hidrocarburos volátiles y alquitranes) que se calienta en hornos verticales a temperaturas de hasta 1150 °C (2100 °F) y después se enfría con agua en torres de enfriamiento. El coque desempeña varias funciones en la fabricación del acero, incluyendo (a) generar el alto nivel de calor requerido para que se presenten las reacciones químicas en la fabricación del hierro y (b) producir monóxido de carbono (un gas reductor, esto significa que elimina oxígeno) para reducir el óxido de hierro a hierro. Los subproductos químicos del coque se utilizan en la síntesis de plásticos y compuestos químicos; los gases desprendidos durante la conversión de carbón en coque se utilizan como combustible para operaciones de la planta.

La función de la *piedra caliza* (carbonato de calcio) consiste en eliminar las impurezas del hierro fundido. La piedra caliza reacciona químicamente con las impurezas, actuando como un **fundente** (es decir, mana como un fluido) que hace que las impurezas se fundan a una temperatura baja. La piedra caliza se combina con las impurezas y forma una **escoria** (la cual, por ser ligera, flota sobre el metal fundido y posteriormente se elimina). La *dolomita* (un mineral de carbonato de calcio y magnesio) se utiliza también como fundente. La escoria se utiliza posteriormente en la fabricación de cemento, fertilizantes, vidrio, materiales de construcción, aislamiento de lana mineral y balastro para carreteras.

5.2.2 Fabricación de hierro

Las tres materias primas recién descritas se vierten en la parte superior de un **alto horno** (figura 5.1), ésta es una operación llamada *carga del horno*. Un alto horno es básicamente un cilindro de acero de gran tamaño forrado con material refractario (resistente al calor), hecho de ladrillo y con la altura aproximada de un edificio de 10 pisos. La mezcla de carga se funde en una reacción a 1650 °C (3000 °F), con aire precalentado a unos 1100 °C (2000 °F) e *inyectado* en el horno (de ahí el término en inglés de “blast furnace”) a través de boquillas llamadas *toberas*. Aunque pueden ocurrir varias reacciones adicionales, la reacción básica es la combinación del oxígeno con el carbono para producir monóxido de carbono el cual, a su vez, reacciona con el óxido de hierro y lo reduce a **hierro**. El precalentamiento del aire entrante es necesario porque la sola combustión del coque no produce temperaturas lo suficientemente altas como para que se produzcan estas reacciones.

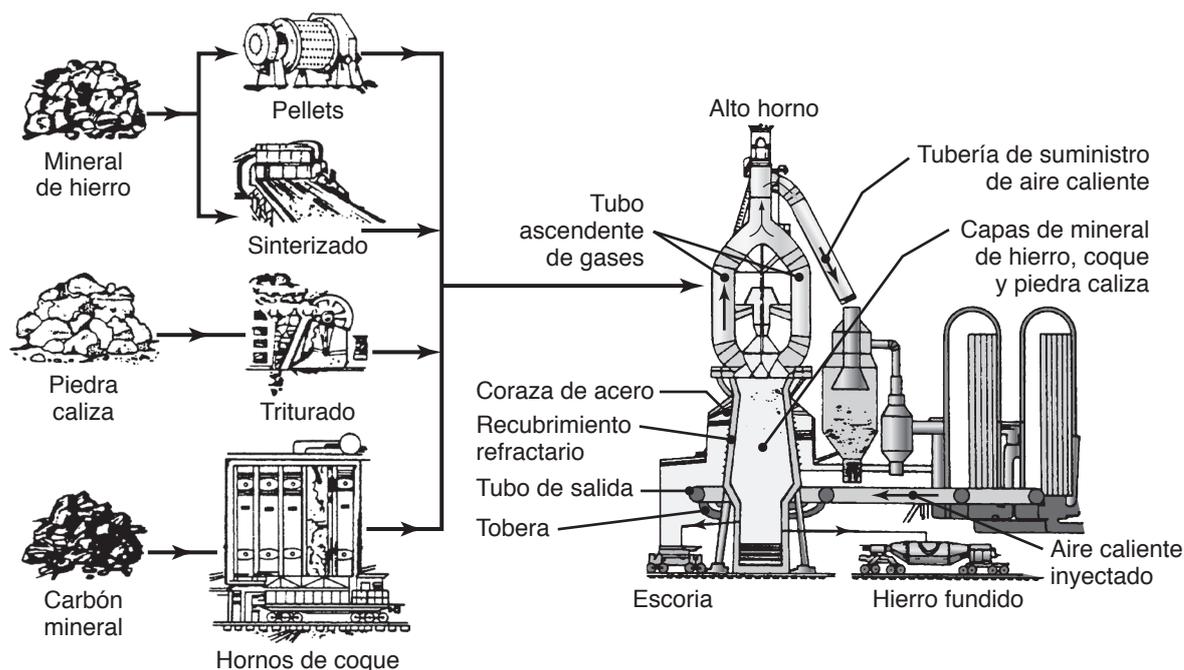


FIGURA 5.1 Ilustración esquemática de un alto horno.

El metal fundido se acumula en la parte inferior del alto horno, mientras que las impurezas flotan en la parte superior. A intervalos de cuatro o cinco horas, el metal fundido se sangra (*se drena*) en carros torpedos que contienen cada uno hasta 160 toneladas de hierro fundido. En esta etapa, el metal fundido se denomina **hierro cochino**, o **arrabio**, y tiene una composición típica de 4% de C, 1.5% de Si, 1% de Mn, 0.04% de S, 0.4% de P y el resto es hierro. La palabra **cochino** proviene de la antigua práctica de verter el hierro fundido en pequeños moldes de arena dispuestos en torno a un canal principal, lo que recordaba a los primeros forjadores una camada de cerdos pequeños amontonados contra el vientre de su madre. Después, el metal solidificado se utiliza en la fabricación de hierro y acero.

5.2.3 Fabricación de acero

El acero se produjo por primera vez en China y Japón aproximadamente entre los años 600 y 800 d. C. El proceso de fabricación del acero consiste esencialmente en **refinar** el hierro cochino mediante (a) la reducción de los porcentajes de manganeso, silicio, carbono y otros elementos y (b) el control de la composición del producto a través de la adición de diversos elementos. El metal fundido producido por el alto horno se transporta hacia uno de cuatro tipos de horno: **hogar abierto**, **eléctrico**, **de vacío** o **básico al oxígeno**. El nombre “hogar abierto” se deriva del hogar poco profundo que se abre directamente hacia las flamas que funden el metal. Desarrollado en la década de 1860, el horno de hogar abierto ha sido sustituido esencialmente por hornos eléctricos y por el proceso básico al oxígeno, ya que los dos últimos son más eficientes y producen aceros de mejor calidad.

Horno eléctrico. En este tipo de horno la fuente de calor es un arco eléctrico continuo que se forma entre los electrodos y el metal cargado (figuras 5.2a y b); las temperaturas que se generan son de hasta 1925 °C (3500 °F). Por lo general, hay tres electrodos

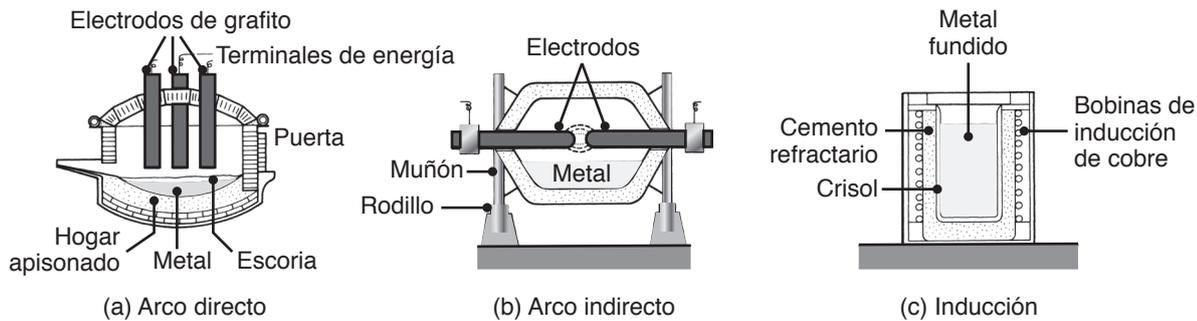


FIGURA 5.2 Ilustración esquemática de los tipos de hornos eléctricos.

de grafito que pueden tener diámetros de hasta 750 mm (30 pulg) y longitudes entre 1.5 y 2.5 m (5 y 8 pies). Su altura en el horno puede ajustarse en respuesta a la cantidad de metal presente y a la cantidad de desgaste de los electrodos.

Chatarra de acero y una pequeña cantidad de carbón y piedra caliza se dejan caer primero en el horno eléctrico a través del techo abierto. Después el techo se cierra y se bajan los electrodos. Se enciende el horno y, en un periodo de aproximadamente dos horas, las temperaturas aumentan lo suficiente como para fundir el metal. Luego se apaga el horno y los electrodos se levantan, el horno se inclina y el metal fundido se vierte en una *olla de traslado* (un receptáculo usado para transferir y verter metal fundido). Las capacidades de los hornos eléctricos van de 60 a 90 toneladas de acero por día y la calidad del acero producido es mejor que la del horno de hogar abierto o del básico al oxígeno (se describe más adelante).

Para cantidades más pequeñas, los hornos eléctricos pueden ser del tipo de **inducción** (figura 5.2c). El metal se coloca en un **crisol**, una gran olla hecha de material refractario y que está rodeada por una bobina de cobre a través de la cual se hace pasar corriente alterna. La corriente inducida en la carga genera calor y el metal se funde.

Horno básico al oxígeno. El Horno básico al oxígeno (BOF, por sus siglas en inglés) es el más rápido y, por mucho, el horno más utilizado para la fabricación de acero. Por lo general, se cargan 200 toneladas de arrabio y 90 toneladas de chatarra en un recipiente (figura 5.3a); algunas unidades pueden contener hasta 350 toneladas. Después se inyecta oxígeno puro en el horno, durante aproximadamente 20 minutos, a través de una *lanza* (un tubo largo) enfriada con agua y bajo una presión de aproximadamente 1250 kPa (180 psi), como se muestra en la figura 5.3b. Los agentes fundentes (como los óxidos de calcio o de magnesio) se añaden a través de un canalón de descarga. El proceso se llama básico debido al pH de estos agentes fundentes.

La agitación vigorosa del oxígeno refina el metal fundido mediante un proceso de oxidación en el que se produce óxido de hierro. El óxido reacciona con el carbono en el metal fundido produciendo monóxido de carbono y dióxido de carbono. Después, la lanza se retrae y el horno se vacía inclinándolo (en la figura 5.3c, note la abertura dispuesta para el metal fundido.) A continuación, la escoria se retira mediante la inclinación del horno en la dirección opuesta. El proceso de BOF es capaz de refinar 250 toneladas de acero en un tiempo de entre 35 y 50 minutos. La mayoría de los aceros obtenidos por BOF tienen bajos niveles de impurezas y son de mejor calidad que los producidos con horno de hogar abierto; estos aceros se transforman en placas, lámina y diversas formas estructurales como vigas I y lámina acanalada (vea la figura 13.1).

Horno de vacío. El acero también puede ser fundido en hornos de inducción de los que se ha eliminado el aire, similar al que se muestra en la figura 5.2c. El enfriamiento se lleva a cabo mediante la inyección de un gas inerte (normalmente argón) a alta presión en el horno. Debido a que la operación elimina impurezas gaseosas del metal fundido e impide

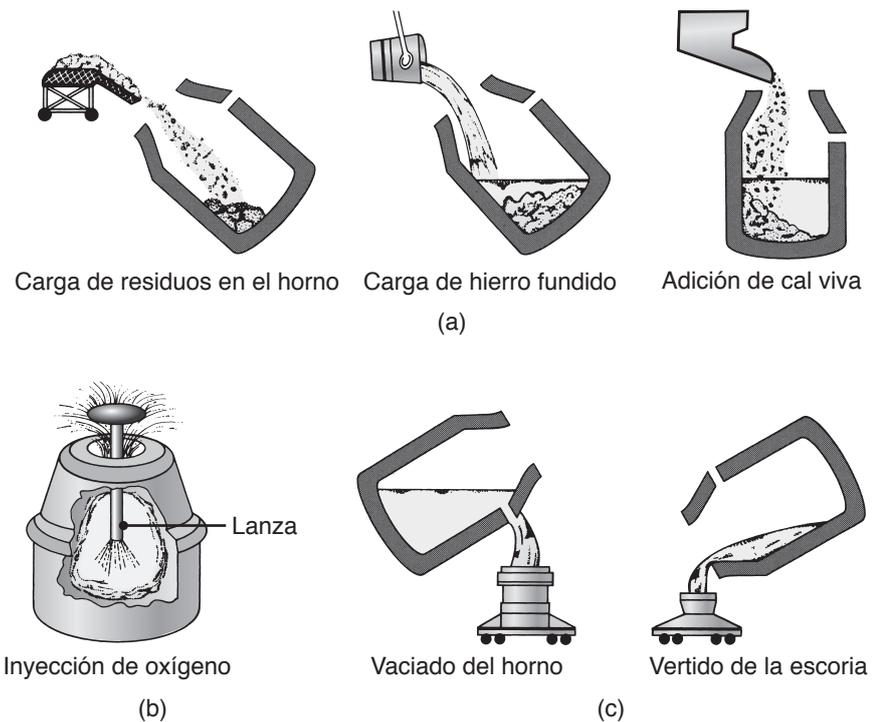


FIGURA 5.3 Ilustraciones esquemáticas que muestran la carga, la fusión y el vertido de hierro fundido en un proceso básico al oxígeno.

la oxidación, los hornos de vacío producen aceros de alta calidad. También se utilizan comúnmente para el tratamiento térmico (sección 4.7) y la soldadura fuerte (sección 32.2).



Código QR 5.1 Animación del vaciado de lingotes. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

5.3 Vaciado de lingotes

Tradicionalmente, el proceso de fabricación de acero implica la conformación del acero fundido en una forma sólida (**lingote**) para darle un tratamiento posterior como laminado en diversas formas, fundición en formas semielaboradas o forjado. El metal fundido se vierte (*colado*) de la olla de traslado a moldes de lingote en los cuales se solidifica el metal. Los moldes se fabrican generalmente a partir de hierro de cubilote o de hierro al alto horno con 3.5% de carbono, además tienen una forma ahusada con el fin de facilitar la extracción del metal solidificado. Las partes inferiores de los moldes pueden ser cerradas o abiertas; si son abiertas, los moldes se colocan en una superficie plana. Después los lingotes se enfrían, se liberan de los moldes y se bajan a fosas de recalentamiento en las que vuelven a calentarse a una temperatura uniforme de aproximadamente 1200 °C (2200 °F) antes de su procesamiento subsecuente.

Durante la solidificación de un lingote ocurren ciertas reacciones que tienen una influencia importante en la calidad del acero producido. Por ejemplo, durante la fabricación de acero pueden disolverse cantidades significativas de oxígeno y otros gases en el metal fundido. La mayor parte de estos gases es rechazada durante la solidificación del metal debido a que el límite de solubilidad de los gases presentes en el metal disminuye bruscamente a medida que desciende su temperatura (vea la figura 10.15). El oxígeno rechazado se combina con el carbono para formar monóxido de carbono, lo que ocasiona porosidad en el lingote solidificado.

Dependiendo de la cantidad de gas desprendido durante la solidificación, pueden producirse tres tipos de lingotes de acero: calmados, semicalmados y efervescentes.

1. **Acero calmado.** El término *calmado* (también referido como *muerto* por diversos autores) proviene del hecho de que el acero permanece en reposo después de haber sido vertido en el molde. El **acero calmado** es un acero totalmente desoxidado; es decir, el oxígeno se retira y de este modo la porosidad asociada se elimina. En el proceso de desoxidación, el oxígeno disuelto en el metal fundido se hace reaccionar con elementos tales como aluminio, silicio, manganeso y vanadio que han sido añadidos a la masa fundida. Estos elementos tienen cierta afinidad con el oxígeno y forman óxidos metálicos. Si se utiliza aluminio, el producto se llama *acero calmado desoxidado con aluminio* (vea la tabla 16.4).

Si son lo suficientemente grandes, las inclusiones de óxido en el baño fundido flotan hacia fuera y se incorporan a, o se disuelven en, la escoria. Así, un acero totalmente calmado está libre de cualquier porosidad causada por gases; también está libre de **sopladuras** (grandes agujeros esféricos cercanos a la superficie del lingote). En consecuencia, las propiedades mecánicas y químicas de un lingote de acero calmado son relativamente uniformes en todo el lingote. Sin embargo, debido a la contracción que ocurre durante la solidificación, un lingote de este tipo desarrolla un **rechupe** en la parte superior (también llamada **cavidad de contracción**); este rechupe tiene la apariencia de un embudo. El rechupe puede implicar un volumen sustancial del lingote y tiene que cortarse y desecharse.

2. **Acero semicalmado.** El **acero semicalmado** es un *acero parcialmente desoxidado*. Contiene cierta porosidad (generalmente, en la sección central superior del lingote), pero poco o ningún rechupe. Aunque en los aceros semicalmados el fenómeno de rechupe es menor, esta ventaja tiene como contraparte la presencia de porosidad en esa región. La producción de los aceros semicalmados es económica.
3. **Acero efervescente.** En un **acero efervescente**, que a menudo presenta un contenido de carbono menor al 0.15%, los gases desprendidos sólo están parcialmente calmados (o controlados) debido a la adición de otros elementos, como aluminio. Los gases producen sopladuras a lo largo del borde exterior del lingote —de ahí el término *efervescente*—. Estos aceros tienen poco o ningún rechupe y una corteza dúctil con un buen acabado superficial; sin embargo, si no se controlan adecuadamente, las sopladuras pueden romper la corteza. Por otra parte, las impurezas e inclusiones tienden a segregarse hacia el centro del lingote. Por lo tanto, los productos fabricados con este acero pueden estar defectuosos y resulta esencial realizarles una inspección minuciosa.

Refinamiento. Las propiedades y características de manufactura de las aleaciones ferrosas se ven afectadas negativamente por la cantidad de impurezas, inclusiones y otros elementos presentes (vea la sección 2.10). La eliminación de impurezas se conoce como *refinamiento*. La mayor parte del refinamiento se realiza en los hornos de fusión o en las cucharas de traslado mediante la adición de diversos elementos.

El refinamiento es particularmente importante en la producción de aceros de alta calidad y en aleaciones para aplicaciones críticas y de alto desempeño, como componentes de aeronaves, elementos estructurales de automóviles, dispositivos médicos y cuchillería. Por otra parte, los periodos de garantía en los ejes, árboles de levas, cigüeñales y piezas similares pueden incrementarse significativamente por el uso de aceros de mayor calidad. Tales aceros se someten a un **refinamiento secundario** en cuchara (**metalurgia de olla**) y en ollas de refinación (**refinamiento por inyección**) que generalmente consiste en la fusión y el procesamiento del acero al vacío. Se han desarrollado varios procesos que utilizan atmósferas controladas tales como la fusión con haz de electrones, la refusión al vacío con arco, la descarburización de argón y oxígeno y la refusión al vacío con arco de doble electrodo.

5.4 Fundición continua

Concebida en la década de 1860, la **fundición continua** o **en líneas** se desarrolló por primera vez para la fundición de bandas metálicas no ferrosas. En la actualidad, el proceso se utiliza ampliamente para la producción de acero con importantes mejoras en la pro-

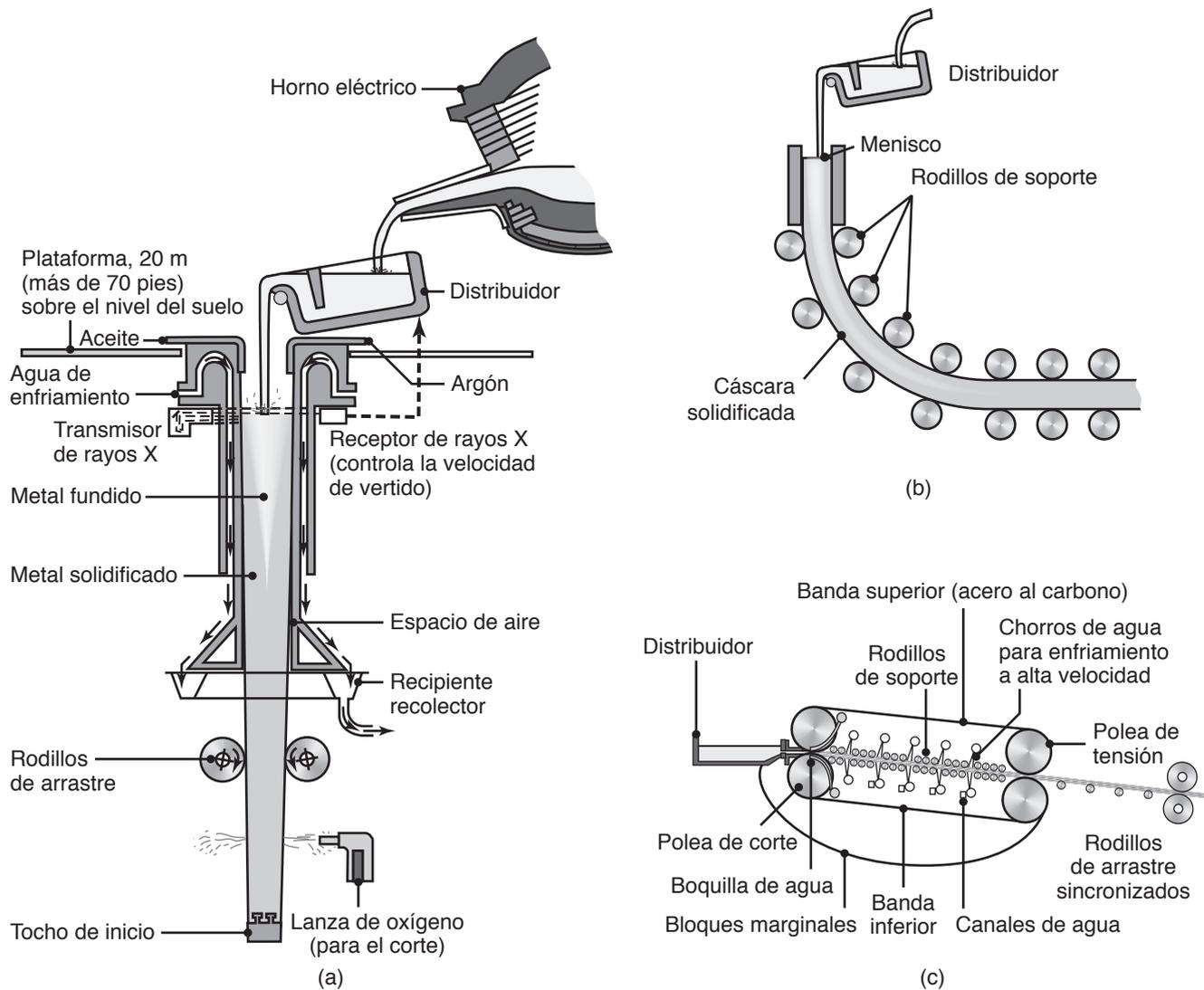


FIGURA 5.4 (a) Proceso de fundición continua del acero. Por lo general, el metal solidificado desciende a una velocidad de 25 mm/s (1 pulg/s); observe que la plataforma está aproximadamente a 20 m (65 pies) sobre el nivel del suelo. Fuente: Figura adaptada a partir de *Metalcaster's Reference and Guide* (c. 1989, p. 41), American Foundrymen's Society. (b) Fundición continua que utiliza rodillos guía o de soporte para permitir la transición desde una zona de vertido vertical hasta transportadores horizontales. (c) Fundición continua de una tira de metal no ferroso. Fuente: Cortesía de Hazelett Corporation.



Código QR 5.2 Animación de una fundición continua. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

ductividad y reducciones de costos. En la figura 5.4a se muestra esquemáticamente un sistema para la fundición continua. En la olla de traslado se limpia el metal fundido, luego se iguala la temperatura mediante inyección de gas nitrógeno a través de la olla durante un periodo de entre 5 y 10 minutos. El metal se vierte después en un recipiente intermedio revestido de material refractario (**distribuidor**) y ahí se separan las impurezas por medio del desnatado. El distribuidor contiene hasta tres toneladas de metal. Enseguida, el metal fundido se desplaza hacia abajo desde el distribuidor, a través de moldes de cobre enfriados mediante agua, y empieza a solidificarse a medida que es jalado a lo largo del molde a una velocidad constante por medio de rodillos (llamados *rodillos de arrastre*).

Antes de iniciar la operación de fundición, una *barra de inicio* (*barra ficticia*) sólida se inserta en la parte inferior del molde. Cuando el metal fundido se vierte por primera vez, se solidifica sobre la barra ficticia. La barra se retira a la misma velocidad a la que

se vierte el metal. La velocidad de enfriamiento es tal que el metal desarrolla una cáscara solidificada, de modo que se sostenga por sí sola durante su recorrido hacia abajo, típicamente a velocidades aproximadas de 25 mm/s (1 pulg/s). En el extremo de salida del molde, el grosor de la cáscara se encuentra aproximadamente entre los 12 y 18 mm (0.5 y 0.75 pulg). Se proporciona un enfriamiento auxiliar mediante chorros de agua a lo largo de la trayectoria de desplazamiento del metal en solidificación. Los moldes suelen recubrirse con lubricantes sólidos de grafito o similares para reducir tanto la fricción como la adhesión en las interfaces del molde con el metal; los moldes también se hacen vibrar con el fin de reducir la fricción y la adherencia.

El metal colado continuamente puede cortarse en las longitudes deseadas mediante un cizallado o usando corte con soplete controlado por computadora; también puede ser alimentado directamente en una laminadora para obtener una reducción adicional del espesor y para la conformación de productos como canales y vigas en I. Además de un menor costo, los metales colados en forma continua tienen composiciones y propiedades más uniformes que los obtenidos mediante el vaciado de lingotes.

Las instalaciones modernas incluyen operaciones controladas por computadora sobre líneas de fundición continua con un grosor de lámina final de entre 2 y 6 mm (0.08 y 0.25 pulg) para los aceros al carbono e inoxidables. Estas instalaciones tienen la capacidad de conmutar rápidamente de un tipo de acero a otro. Las placas de acero u otras formas se someten a uno o más procesamientos adicionales, como (a) limpieza y tratamiento químico para eliminar óxidos de la superficie; (b) laminado en frío para mejorar la resistencia y el acabado superficial; (c) recocido y (d) galvanizado o aluminizado para mejorar la resistencia a la corrosión.

En la **fundición de tiras** se producen palanquillas delgadas o tiras a partir del metal fundido. El metal se solidifica en forma similar a la fundición continua, pero luego el sólido caliente se lamina para producir la forma final (figura 5.4b). Los esfuerzos de compresión aplicados en el laminado (vea la sección 13.2) sirven para reducir la porosidad y proporcionar mejores propiedades a los materiales. En efecto, la fundición de tiras elimina una operación de laminado en caliente en la producción de tiras o palanquilla de metal.

5.5 Aceros al carbono y aleados

El acero es una aleación que consiste principalmente en hierro y tiene un contenido de carbono de entre 0.2 y 2.1% en peso. Las aleaciones con una concentración de carbono más alta que el 2.1% se conocen como hierros fundidos (se analizan en la sección 12.3.2) y tienen un punto de fusión más bajo que otros aceros y una buena capacidad de vaciar y llenar el molde (colabilidad). Los aceros al carbono y de aleación se encuentran entre los metales que se usan con mayor frecuencia y tienen una amplia variedad de composiciones, opciones de procesamiento y aplicaciones (tabla 5.1). Estos aceros están disponibles en una gran variedad de productos con formas básicas como placas, láminas, tiras, barras, alambres, tubos, piezas fundidas y piezas forjadas.

5.5.1 Efectos de diferentes elementos en los aceros

A los aceros se les añaden diferentes elementos con el fin de impartirles propiedades específicas como templeabilidad, resistencia, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, capacidad de trabajo (trabajabilidad), soldabilidad y maquinabilidad. Estos elementos se muestran en la tabla

TABLA 5.1

Aplicaciones para los aceros al carbono y de aleación seleccionados

Producto	Acero
Piezas forjadas, tubos y accesorios para aviones	4140, 8740
Carrocerías de automóvil	1010
Ejes	1040, 4140
Cojinetes de bolas y pistas	52100
Pernos	1035, 4042, 4815
Árboles de levas	1020, 1040
Cadenas (de transmisión)	3135, 3140
Resortes helicoidales	4063
Bielas	1040, 3141, 4340
Cigüeñales (forjados)	1045, 1145, 3135, 3140
Engranajes diferenciales	4023
Engranajes (automóviles y camiones)	4027, 4032
Trenes de aterrizaje	4140, 4340, 8740
Arandelas de seguridad	1060
Tuercas	3130
Rieles y ruedas de ferrocarril	1080
Resortes (de bobina)	1095, 4063, 6150
Resortes (de hoja)	1085, 4063, 9260, 6150
Tubería	1040
Alambre	1045, 1055
Cuerdas (para música)	1085

TABLA 5.2

Efectos de diferentes elementos en los aceros	
Elemento	Efecto
Aluminio	Desoxida los aceros nitrurados, limita el crecimiento del grano de la austenita, aumenta la dureza de los aceros nitrurados.
Bismuto	Mejora la maquinabilidad.
Boro	Mejora la dureza sin pérdida (y quizás con alguna mejora) de la maquinabilidad y la formabilidad.
Calcio	Desoxida el acero, mejora la tenacidad, puede mejorar la formabilidad y la maquinabilidad.
Carbono	Mejora la templabilidad, la resistencia, la dureza y la resistencia al desgaste; reduce la ductilidad, la soldabilidad y la tenacidad.
Cerio, magnesio, zirconio	Desoxida el acero, mejora la tenacidad de los aceros HSLA, controla la forma de las inclusiones.
Cromo	Mejora la tenacidad, la templabilidad y la resistencia al desgaste y a la corrosión, así como la resistencia a la alta temperatura; promueve el carburizado y la profundidad del endurecimiento en el tratamiento térmico.
Cobalto	Mejora la resistencia y la dureza a temperaturas elevadas.
Cobre	Mejora la resistencia a la corrosión atmosférica; puede incrementar la resistencia sin pérdida de ductilidad; afecta negativamente la trabajabilidad en caliente y la calidad de la superficie.
Plomo	Mejora la maquinabilidad; puede causar fragilidad por metal líquido.
Manganeso	Desoxida el acero, mejora la templabilidad, la resistencia, la resistencia a la abrasión y la maquinabilidad; reduce la fragilidad en caliente; disminuye la soldabilidad.
Molibdeno	Mejora la templabilidad, la resistencia al desgaste, la tenacidad, la resistencia a temperaturas elevadas, la resistencia a la cedencia y la dureza; minimiza la fragilización por revenido.
Níquel	Mejora la resistencia, la tenacidad, la resistencia a la corrosión y la templabilidad.
Niobio, tantalio	Mejora la resistencia y la tenacidad al impacto; reduce la temperatura de transición dúctil-frágil; puede disminuir la dureza.
Fósforo	Mejora la resistencia, la templabilidad, la resistencia a la corrosión y la maquinabilidad; reduce severamente la ductilidad y la dureza.
Selenio	Mejora la maquinabilidad.
Silicio	Mejora la resistencia, la dureza, la resistencia a la corrosión y la conductividad eléctrica; disminuye la maquinabilidad y la formabilidad en frío.
Azufre	Mejora la maquinabilidad cuando se combina con el manganeso; disminuye la resistencia al impacto, la ductilidad y la soldabilidad.
Telurio	Mejora la maquinabilidad, la formabilidad y la tenacidad.
Titanio	Desoxida el acero; mejora la templabilidad.
Tungsteno	Mejora la dureza, especialmente a temperaturas elevadas.
Vanadio	Mejora la resistencia, la tenacidad, la resistencia a la abrasión y la dureza a temperaturas elevadas; inhibe el crecimiento del grano durante el tratamiento térmico.

5.2 con resúmenes de sus efectos benéficos y perjudiciales. En general, a mayor porcentaje de estos elementos en los aceros, mayores serán las propiedades particulares que impartan. Por ejemplo, entre mayor sea el contenido de carbono, mayor será la templabilidad del acero y más grandes serán su resistencia, dureza y resistencia al desgaste. Por otro lado, al aumentar el contenido de carbono se reducen la soldabilidad, la ductilidad y la tenacidad.

Algunos *elementos residuales*, llamados **elementos en trazas**, pueden permanecer después de la producción, la refinación y el procesamiento de los aceros. Aunque los elementos de la tabla 5.2 también pueden ser considerados como residuos, los siguientes suelen verse como elementos residuales no deseados:

El **antimonio** y el **arsénico** causan fragilización por revenido.

El **hidrógeno** fragiliza severamente los aceros; sin embargo, el calentamiento durante el proceso elimina la mayor parte del hidrógeno.

El **nitrógeno** mejora la resistencia, la dureza y la maquinabilidad; en los aceros de aluminio desoxidados, controla el tamaño de las inclusiones. El nitrógeno puede aumentar o disminuir la resistencia, la ductilidad y la tenacidad, dependiendo de la presencia de otros elementos.

El **oxígeno** incrementa ligeramente la resistencia de los aceros efervescentes, reduce severamente la tenacidad.

El **estaño** provoca fragilidad en caliente y fragilización por revenido.

5.5.2 Designaciones para los aceros

Tradicionalmente, el American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE) han designado a los aceros al carbono y de aleación con cuatro dígitos. Los dos primeros dígitos indican los elementos de aleación y sus porcentajes y los dos últimos dígitos indican el contenido de carbono en peso.

La American Society for Testing and Materials (ASTM) tiene un sistema de designación que incorpora las designaciones AISI y SAE e incluye especificaciones estándar para los productos de acero. En el caso de los metales ferrosos, la designación consiste en la letra “A” seguida de algunos números (generalmente tres). El sistema de numeración estándar actual se conoce como *Sistema de Numeración Unificado* (UNS, por sus siglas en inglés) y ha sido ampliamente adoptado por las industrias de metales ferrosos y no ferrosos. Se compone de una letra, que indica la clase general de la aleación, seguida de cinco dígitos, que indican su composición química. Las designaciones comunes con letras son:

- G — Aceros al carbono y de aleación AISI y SAE.
- J — Aceros fundidos.
- K — Aceros diversos y aleaciones ferrosas.
- S — Aceros inoxidable y superaleaciones.
- T — Acero para herramientas.

Dos ejemplos son: G41300 para el acero de aleación AISI 4130 y T30108 para el acero para herramientas AISI A-8.

5.5.3 Aceros al carbono

Los aceros al carbono se clasifican generalmente por su proporción, en peso, del contenido de carbono. Las propiedades mecánicas generales de los aceros al carbono y de aleación se listan en la tabla 5.3; el efecto del carbono en las propiedades del acero se muestra en la figura 5.5 y se resumen de la siguiente manera:

- El **acero al bajo carbono**, también llamado **acero dulce**, tiene menos de 0.30% de C. A menudo se utiliza en productos industriales comunes (como pernos, tuercas, chapas, placas y tubos) y en componentes de máquinas que no requieren alta resistencia.
- El **acero al medio carbono** tiene entre 0.30 y 0.60% de C. Generalmente se usa en aplicaciones que requieren mayor resistencia que la disponible en los aceros al bajo carbono, como en maquinaria, automóviles y piezas para maquinaria agrícola (engranes, ejes, bielas y cigüeñales), equipo ferroviario y repuestos para maquinaria metalúrgica.
- El **acero al alto carbono** tiene más de 0.60% de C. Por lo general, el acero al alto carbono se utiliza para aplicaciones que requieren resistencia mecánica, dureza y resistencia al desgaste, como en herramientas de corte, cables, cuerdas musicales, resortes y cuchillería. Después de haber sido formadas, las piezas suelen tratarse térmicamente y revenirse. Cuanto más alto sea el contenido de carbono en el acero,

TABLA 5.3

Propiedades mecánicas típicas de los aceros al carbono y de aleación seleccionados						
AISI	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Reducción de área (%)	Dureza típica (HB)
1020	Condición de laminado	448	346	36	59	143
	Normalizado	441	330	35	67	131
	Recocido	393	294	36	66	111
1080	Condición de laminado	1010	586	12	17	293
	Normalizado	965	524	11	20	293
	Recocido	615	375	24	45	174
3140	Normalizado	891	599	19	57	262
	Recocido	689	422	24	50	197
4340	Normalizado	1279	861	12	36	363
	Recocido	744	472	22	49	217
8620	Normalizado	632	385	26	59	183
	Recocido	536	357	31	62	149

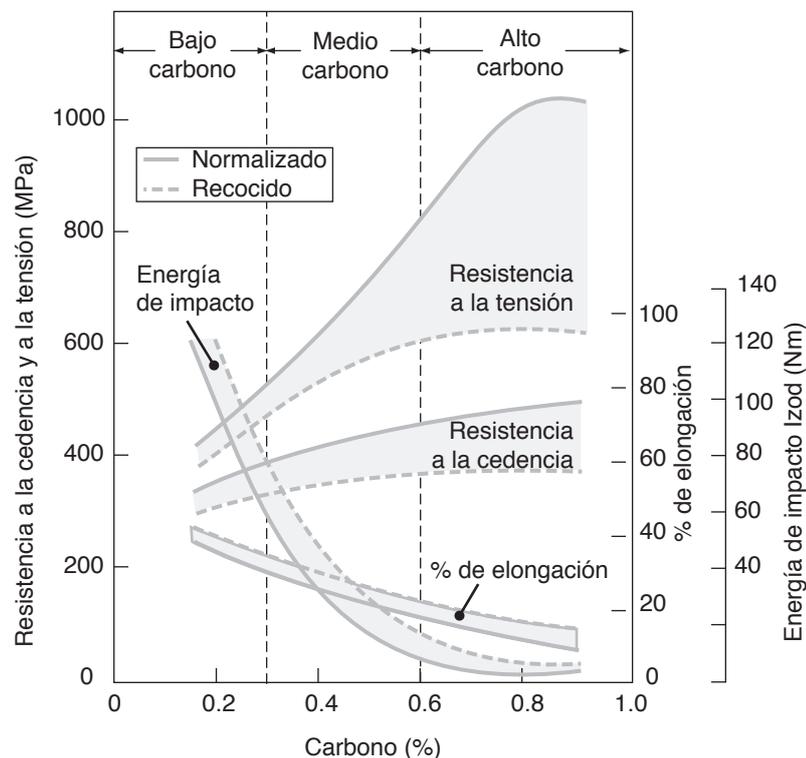


FIGURA 5.5 Efecto del contenido de carbono sobre las propiedades mecánicas del acero al carbono.

mayor será su dureza, resistencia mecánica y resistencia al desgaste después del tratamiento térmico.

- Los aceros al carbono que contienen azufre y fósforo son conocidos como aceros al carbono **resulturados** (serie 11xx) y aceros al carbono **refosforados y resulturados** (serie 12xx). Por ejemplo, el acero 1112 es un acero resulturado con un contenido de carbono del 0.12%. Estos aceros tienen una maquinabilidad mejorada, tal como se describe en la sección 21.7.

5.5.4 Aceros aleados

Los aceros que contienen cantidades significativas de elementos de aleación se denominan **aceros aleados**. Los **aceros aleados grado estructural** se utilizan principalmente en las industrias de la construcción y el transporte debido a su alta resistencia. Otros tipos de aceros aleados se utilizan en aplicaciones donde se requiere resistencia mecánica, dureza, resistencia a la cedencia y resistencia a la fatiga; pueden ser tratados térmicamente para obtener las propiedades específicas deseadas.

5.5.5 Aceros de alta resistencia y baja aleación

Con el fin de mejorar la relación de resistencia a peso en los aceros, se ha desarrollado una serie de **aceros de alta resistencia y baja aleación** (HSLA, por sus siglas en inglés). Estos aceros tienen un bajo contenido de carbono (por lo general menos de 0.30%) y se caracterizan por una microestructura que consiste en ferrita de grano fino como una fase y una segunda fase dura de martensita y austenita. En la tabla 5.4 se proporcionan las propiedades mecánicas de varios aceros HSLA seleccionados. Estos aceros tienen altas capacidades de resistencia y absorción de energía en comparación con los aceros convencionales. Sin embargo, la ductilidad, la conformabilidad y la soldabilidad de los aceros HSLA suelen ser inferiores a las de los aceros de baja aleación convencionales (vea la figura 5.6). Para mejorar estas propiedades se han desarrollado varios aceros de ultra alta resistencia, como se describe en la sección 5.5.6.

Los productos hechos con aceros HSLA se utilizan normalmente para piezas de carrocería en automóviles y otros equipos de transporte (con el fin de reducir el peso y, por lo tanto, el consumo de combustible), así como en la minería, la agricultura y otras aplicaciones industriales. Las placas se utilizan en barcos, puentes, construcción de edificios y para formas como vigas en I, canales y ángulos utilizados en construcciones y diferentes estructuras.

Designaciones. El sistema de denominaciones AISI para las hojas de acero de alta resistencia (tabla 5.5) consta de tres categorías: (a) Los aceros de *calidad estructural* (S) incluyen los elementos C, Mn, P y N; (b) los de *baja aleación* (X) contienen Nb, Cr, Cu, Mo, Ni, Si, Ti, V y Zr, ya sea solos o en combinación; (c) los *aceros para intemperie* (W) tienen una resistencia a la corrosión del medio ambiente que es aproximadamente cuatro veces mayor que la de los aceros al bajo carbono convencionales y contienen Si, P, Cu,

TABLA 5.4

Propiedades mecánicas de los aceros avanzados de alta resistencia seleccionados				
Acero	Resistencia a la tensión mínima (MPa)	Resistencia a la cedencia mínima (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Exponente de endurecimiento por deformación, <i>n</i>
BH 210/340	340	210	36	0.18
BH 260/370	370	260	32	0.13
HSLA 350/450	450	450	25	0.14
DP 350/600	600	600	27	0.14
DP 500/800	800	800	17	0.14
DP 700/1000	1000	1000	15	0.13
TRIP 450/800	800	450	29	0.24
TRIP 400/600	600	400	30	0.23
CP 700/800	800	700	12	0.13
MART 950/1200	1200	950	6	0.07
MART 1250/1520	1520	1250	5	0.065
27MnCrB5, condición de laminado	967	478	12	0.06
27MnCrB5, estampado en caliente	1350	1097	5	0.06
37MnB4, condición de laminado	810	580	12	0.06
37MnB4, estampado en caliente	2040	1378	4	0.06

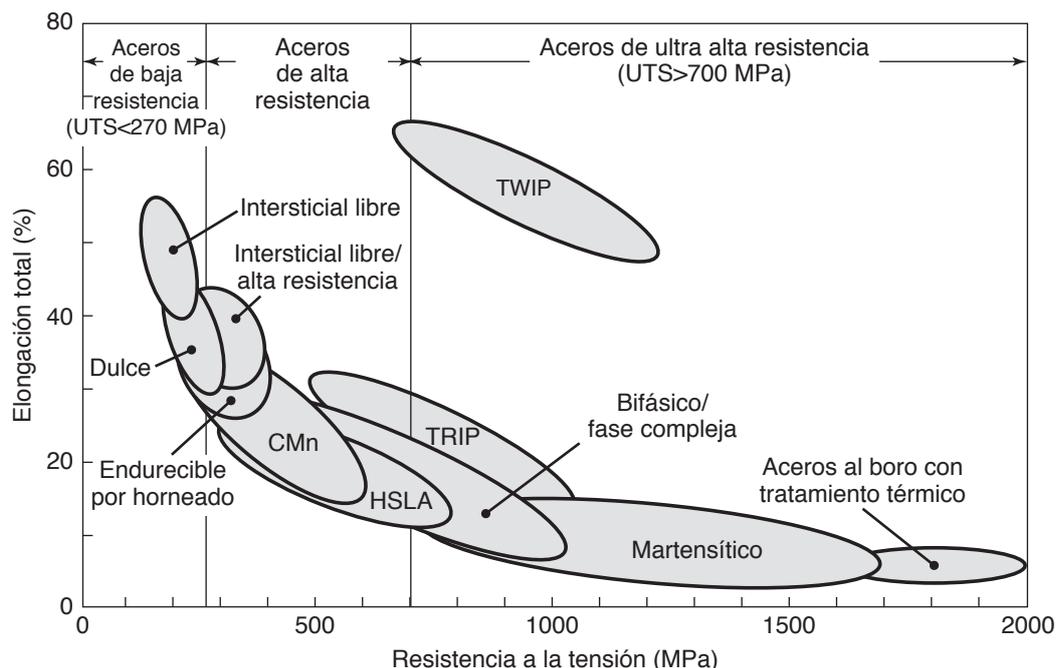


FIGURA 5.6 Comparación de aceros avanzados de alta resistencia.

TABLA 5.5

Designaciones AISI para las hojas de acero de alta resistencia

Resistencia a la cedencia		Composición química	Práctica de desoxidación
ksi	MPa		
35	240	S = calidad estructural	F = calmado más control de las inclusiones de sulfuros
40	275	X = baja aleación	K = calmado
45	310	W = intemperismo	O = no calmado
50	350	D = bifásico	
60	415		
70	485		
80	550		
100	690		
120	830		
140	970		
Ejemplo: 50XF			
50 × 10 ³ psi min resistencia a la cedencia		Baja aleación	Calmado más control de las inclusiones de sulfuros

Ni y Cr en diversas combinaciones. Además, la formabilidad de estas láminas de acero se clasifica con las letras F (excelente), K (buena) y O (suficiente).

Otro esquema de designación de amplio uso es el definido por el consorcio Ultralight Steel Auto Body (ULSAB). La práctica de ULSAB consiste en definir tanto el tipo de un acero como sus resistencias a la cedencia y a la tensión, en una designación compacta, en la forma XX aaa/bbb, donde XX es el tipo de acero, aaa es la resistencia a la cedencia en MPa y bbb es la resistencia a la tensión en MPa. Los tipos de acero son:

- BH — Endurecible por horneado
- HSLA — De alta resistencia y baja aleación
- DP — Bifásico
- TRIP — Transformación inducida por plasticidad
- TWIP — Plasticidad inducida por maclado
- MART — Martensítico
- CP — De fase compleja

Así, por ejemplo, HSLA 350/450 sería un acero de alta resistencia y baja aleación con una resistencia a la cedencia mínima de 350 MPa y una resistencia a la tensión mínima de al menos 450 MPa.

Aceros microaleados. Estos aceros aportan propiedades superiores y pueden eliminar la necesidad de tratamiento térmico. Tienen una microestructura de ferrita-perlita con finas partículas de carbonitrúro dispersas. Cuando se someten a un enfriamiento cuidadosamente controlado (por lo general al aire libre), estos aceros desarrollan una mejor y más uniforme resistencia. En comparación con los aceros al medio carbono, los **aceros microaleados** también pueden proporcionar ahorros en costos de hasta el 10% porque no requieren los pasos de templado, revenido y alivio de esfuerzos.

Aceros nanoaleados. Estos aceros tienen tamaños de grano extremadamente pequeños (10-100 nm) y se producen utilizando vidrios metálicos (sección 6.14) como precursores. El cristal metálico se somete a un proceso de vitrificación (cristalización) cuidadosamente controlado a una alta velocidad de nucleación, lo que resulta en fases finas a nanoescala (vea también la sección 8.8).

5.5.6 Aceros de ultra alta resistencia

Los aceros de ultra alta resistencia son definidos por AISI como aquellos que tienen una resistencia a la tensión superior a 700 MPa (100 ksi). Hay cinco tipos importantes de aceros de ultra alta resistencia: bifásicos, TRIP, TWIP, de fase compleja y martensíticos. La principal aplicación de estos aceros se da en el diseño de automóviles a prueba de choques. El uso de aceros más fuertes permite habilitar componentes estructurales con secciones transversales más pequeñas, lo que resulta en un ahorro de peso y en un aumento de la economía de combustible sin comprometer la seguridad. Los inconvenientes más significativos de todos estos aceros son una recuperación elástica más alta, el desgaste de herramientas y dados y la formación de cargas.

Los **aceros bifásicos** se procesan especialmente para obtener una estructura mixta de ferrita y martensita. Tienen un alto exponente de endurecimiento por trabajo, n , en la ecuación (2.8), lo que mejora su ductilidad y conformabilidad.

Los **aceros TRIP** consisten en una matriz de ferrita-bainita y entre 5 y 20% de austenita retenida. Durante el formado, la austenita se transforma progresivamente en martensita. Los aceros TRIP tienen excelente ductilidad (a causa de la austenita) y alta resistencia después del formado. En consecuencia, pueden utilizarse para producir piezas más complejas que otros aceros de alta resistencia.

Los **aceros TWIP** (por las siglas en inglés de plasticidad inducida por maclado) son austeníticos y tienen un alto contenido de manganeso (entre 17 y 20%). Estos aceros obtienen sus propiedades a partir de la generación de maclas durante la deformación (vea la sección 1.4) sin un cambio de fase, lo que resulta en muy alto endurecimiento por deformación y evita que se adelgacen durante el procesamiento. Como se muestra en la figura 5.5, los aceros TWIP combinan una alta resistencia con una alta conformabilidad.

Los **grados de fase compleja** (grados CP) son microestructuras con granos muy finos de ferrita y una fracción de alto volumen de fases duras (martensita y bainita). Estos aceros tienen resistencias máximas a la tensión de hasta 800 MPa (115 ksi) por lo que resultan interesantes para aplicaciones automotrices contra los choques, como las defensas y los soportes del toldo. También se dispone de los *grados martensíticos* que consisten en fracciones elevadas de martensita para alcanzar resistencias a la tensión tan altas como 1500 MPa (217 ksi).

CASO DE ESTUDIO 5.1 Aceros avanzados de alta resistencia en automóviles

El incremento de la economía de combustible en los automóviles ha recibido considerable atención en los últimos años por razones tanto ambientales como económicas. Los requisitos regulatorios exigen a los fabricantes de automóviles el logro de un *ahorro de combustible promedio corporativo* (CAFE, por sus siglas en inglés). Para lograr una mayor economía de combustible sin comprometer el rendimiento o la seguridad, los fabricantes han venido aplicando cada vez

más aceros avanzados de alta resistencia en los elementos estructurales de los automóviles; por ejemplo, en la figura 5.7 se muestra la aplicación de acero en el automóvil Ford 500. Observe que aunque 60% del acero presente en este automóvil es dulce y está asociado con los paneles de la carrocería y componentes de la transmisión y el motor, los componentes estructurales están explotando las relaciones más altas de fuerza a peso de los aceros avanzados de alta resistencia.

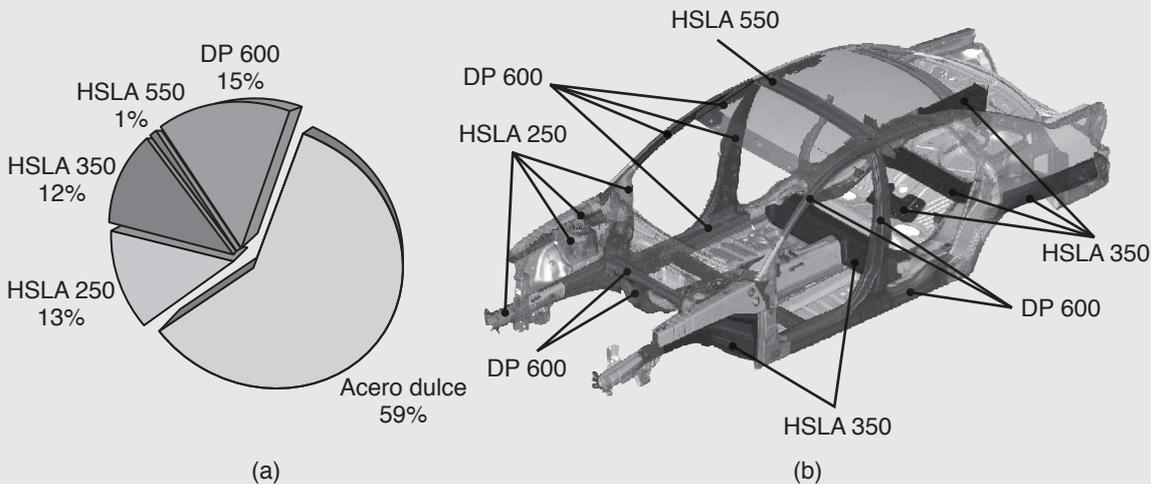


FIGURA 5.7 Aplicaciones del acero avanzado de alta resistencia en el automóvil Ford 500. (a) Uso de aceros avanzados de alta resistencia por su porcentaje en peso; (b) aleaciones y componentes estructurales utilizados. Fuente: Cortesía del American Iron and Steel Institute.

5.6 Aceros inoxidables

Los **aceros inoxidables** se caracterizan principalmente por su resistencia a la corrosión, alta resistencia y ductilidad. Se les llama *inoxidables* porque, en presencia de oxígeno (aire), desarrollan una película delgada, dura y adherente de óxido de cromo que protege al metal de la corrosión (*pasivación*; vea la sección 3.8); esta película protectora se reconstruye de nuevo en caso de que la superficie sea rayada. Para que se produzca la pasivación, el contenido mínimo de cromo debe ser de entre 10 y 12% en peso. Además de cromo y carbono, otros elementos de aleación presentes en los aceros inoxidables suelen ser níquel, molibdeno, cobre, titanio, silicio, manganeso, niobio, aluminio, nitrógeno y azufre.

Cuanto mayor sea el contenido de carbono, menor será la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables. La razón es que el carbono se combina con el cromo presente en el acero y forma carburo de cromo; la presencia reducida de cromo disminuye la pasividad del acero. Además, el carburo de cromo introduce una segunda fase y, por lo tanto, promueve la corrosión galvánica.

Los aceros inoxidables, que fueron desarrollados en la década de 1900, se fabrican en hornos eléctricos o mediante el proceso básico al oxígeno y usando técnicas similares a las utilizadas en otros tipos de fabricación de acero. El nivel de pureza se controla a través de diversas técnicas de refinamiento. Los aceros inoxidables están disponibles en una amplia variedad de formas. Las aplicaciones típicas incluyen cuchillería, equipo de cocina, equipamiento quirúrgico y para el cuidado de la salud, así como aplicaciones en las industrias química, alimenticia y petrolera.

Por lo general, los aceros inoxidables se dividen en cinco tipos (vea también la tabla 5.6).

Austeníticos (series 200 y 300). Estos aceros generalmente están compuestos de cromo, níquel y manganeso en hierro. Son no magnéticos y tienen una excelente resistencia a la corrosión, pero son susceptibles de sufrir agrietamiento por corrosión por esfuerzo (sección 3.8). Los aceros inoxidables austeníticos, que se endurecen por trabajo en frío, son los más dúctiles de todos los aceros inoxidables y pueden formarse con facilidad. Se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones como utensilios de cocina, accesorios, construcciones soldadas, equipos de transporte ligero, piezas de hornos e intercambiadores de calor y componentes para entornos químicos severos.

Ferríticos (serie 400). Estos aceros tienen un alto contenido de cromo. Son magnéticos y presentan buena resistencia a la corrosión, pero tienen menor ductilidad que los aceros inoxidables austeníticos. Los aceros inoxidables ferríticos se endurecen por trabajo en frío. Por lo general, se utilizan para aplicaciones no estructurales como equipos de cocina y asientos para automóvil.

Martensíticos (series 400 y 500). La mayoría de los aceros inoxidables martensíticos no contienen níquel y se endurecen mediante tratamiento térmico. Estos aceros son magnéticos y tienen una alta resistencia mecánica, dureza y resistencia a la fatiga, buena ductilidad y moderada resistencia a la corrosión. Los aceros inoxidables martensíticos se utilizan normalmente para fabricar cuchillería, herramientas quirúrgicas, instrumentos, válvulas y resortes.

Endurecidos por precipitación (PH). Estos aceros inoxidables contienen cromo y níquel, junto con cobre, aluminio, titanio o molibdeno. Tienen buena resistencia a la co-

TABLA 5.6

Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de los aceros inoxidables recocidos a temperatura ambiente seleccionados				
Designación AISI (UNS)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Características y aplicaciones típicas
303 (S30300)	550-620	240-260	53-50	Productos de tornillería (ejes, válvulas, pernos, bujes y tuercas) y accesorios de aeronaves (pernos, tuercas, remaches, tornillos y prisioneros).
304 (S30400)	5-620	240-290	60-55	Equipo químico y de procesamiento de alimentos, equipo para la elaboración de cerveza, recipientes criogénicos, canalones, bajantes y tapajuntas.
316 (S31600)	50-590	210-290	60-55	Alta resistencia a la corrosión y alta resistencia a la termofluencia, equipamiento químico para el manejo de pulpa, equipo fotográfico, toneles de aguardiente, piezas de fertilizantes, calderas para la preparación de salsa de tomate y contenedores de levadura.
410 (S41000)	480-520	240-310	35-25	Piezas de máquinas, ejes de bombas, pernos, bujes, tolvas de carbón, cuchillería, aparejos, hardware, piezas de motores a reacción, maquinaria para minería, cañones de fusil, tornillos y válvulas.
416 (S41600)	480-520	275	30-20	Accesorios, pernos, tuercas, insertos para la extinción de incendios, remaches y tornillos de aeronaves.

rosión y ductilidad, además poseen una alta resistencia a temperaturas elevadas. Su principal aplicación es en los componentes estructurales aeronáuticos y aeroespaciales.

Estructura dúplex. Estos aceros inoxidable tienen una mezcla de austenita y ferrita. Poseen buena resistencia y una resistencia más alta tanto a la corrosión (en la mayoría de los entornos) como al agrietamiento por corrosión por esfuerzo que los aceros austeníticos de la serie 300. Las aplicaciones típicas se encuentran en las plantas de tratamiento de agua y en los componentes de intercambiadores de calor.

CASO DE ESTUDIO 5.2 Aceros inoxidables en automóviles

Los aceros inoxidables generalmente elegidos por los ingenieros de materiales para ser usados en piezas de automóviles son de los tipos 301, 409, 430 y 434. Debido a su buena resistencia a la corrosión y a sus propiedades mecánicas, el tipo 301 se utiliza para las cubiertas de las ruedas; el trabajo en frío durante el proceso de formado aumenta su resistencia a la cedencia y le proporciona a la cubierta de la rueda una acción tipo resorte.

El tipo 409 es ampliamente utilizado en los convertidores catalíticos. El tipo 430 se utilizaba para los contramarcos de automóvil, pero no es tan resistente como el tipo 434 a la sales de deshielo que se usan en las carreteras durante el invierno en climas fríos;

en consecuencia, su uso está limitado en la actualidad. Además de ser más resistente a la corrosión, el tipo 434 se asemeja mucho al color del recubrimiento de cromo, convirtiéndose así en una alternativa atractiva para sustituir al 430.

El uso de aceros inoxidables también es muy adecuado en otros componentes de automóvil. Algunos ejemplos son: tubos distribuidores (en sustitución de los tubos de hierro fundido para reducir el peso, aumentar la durabilidad, proporcionar mayor conductividad térmica y reducir las emisiones), silenciadores y tubos de escape (para una mejor protección contra la corrosión en ambientes agresivos) y tubos de freno.

5.7 Aceros para herramientas y dados

Los aceros para herramientas y dados son aceros aleados especialmente (tablas 5.7 y 5.8), están diseñados para cubrir los requisitos de herramientas y dados como alta resistencia mecánica, resistencia al impacto y resistencia al desgaste a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas. Se utilizan comúnmente en la formación y transformación de metales (partes III y IV de este libro).

TABLA 5.7

Tipos básicos de aceros para herramientas y dados	
Tipo	AISI
Alta velocidad	M (base de molibdeno) T (base de tungsteno)
Trabajo en caliente	H1 a H19 (base de cromo) H20 a H39 (base de tungsteno) H40 a H59 (base de molibdeno)
Trabajo en frío	D (al alto carbono, al alto cromo) A (aleación media, endurecimiento al aire libre) O (endurecimiento en aceite)
Resistencia al impacto	S
Aceros de molde	P1 a P19 (bajo carbono) P20 a P39 (otros)
Propósito especial	L (baja aleación) F (carbono-tungsteno)
Endurecido por agua	W

5.7.1 Aceros de alta velocidad

Los aceros de alta velocidad (HSS) son los aceros de más alta aleación destinados para herramientas y dados. Fueron desarrollados por primera vez en la década de 1900 y mantienen su dureza y resistencia a altas temperaturas de operación. Existen dos tipos básicos de aceros de alta velocidad: el **tipo de molibdeno** (serie M) y el **tipo de tungsteno** (serie T).

Los aceros de la **serie M** contienen hasta aproximadamente el 10% de molibdeno, con cromo, vanadio, tungsteno y cobalto como otros elementos de aleación. Los aceros de la **serie T** contienen entre 12 y 18% de tungsteno, con cromo, vanadio y cobalto como otros elementos de aleación. Por lo general, los aceros de la serie M tienen mayor resistencia a la abrasión que los de la serie T, experimentan menor distorsión en el tratamiento térmico y son menos costosos. La serie M constituye aproximadamente el 95% de todos los aceros de alta velocidad producidos en Estados Unidos. Las herramientas de acero de alta velocidad pueden ser recubiertas con nitruro de titanio y carburo de titanio para mejorar su resistencia al desgaste.

TABLA 5.8

Características de procesamiento y servicio de los aceros comunes para herramientas y dados							
Designación AISI	Resistencia al descarburizado	Resistencia al agrietamiento	Dureza aproximada (HRC)	Maquinabilidad	Tenacidad	Resistencia al ablandamiento	Resistencia al desgaste
M2	Media	Media	60-65	Media	Baja	Muy alta	Muy alta
H11, 12, 13	Media	La más alta	38-55	Media a alta	Muy alta	Alta	Media
A2	Media	La más alta	57-62	Media	Media	Alta	Alta
A9	Media	La más alta	35-56	Media	Alta	Alta	Media a alta
D2	Media	La más alta	54-61	Baja	Baja	Alta	Alta a muy alta
D3	Media	Alta	54-61	Baja	Baja	Alta	Muy alta
H21	Media	Alta	36-54	Media	Alta	Alta	Media a alta
P20	Alta	Alta	28-37	Media a alta	Alta	Baja	Baja a media
P21	Alta	La más alta	30-40	Media	Media	Media	Media
W1, W2	La más alta	Media	50-64	La más alta	Alta	Baja	Baja a media

5.7.2 Aceros para matrices y dados

Los aceros para trabajo en caliente (serie H) están diseñados para ser usados a temperaturas elevadas. Tienen alta dureza y alta resistencia al desgaste y al agrietamiento. Los elementos de aleación generalmente son tungsteno, molibdeno, cromo y vanadio. Los aceros para trabajo en frío (series A, D y O) se utilizan en las operaciones de trabajo en frío. Por lo general, tienen alta resistencia al desgaste y al agrietamiento y están disponibles en los tipos endurecido al aire y endurecido en aceite. Los aceros resistentes al impacto (serie S) están diseñadas para resistir impactos y se utilizan en aplicaciones como matrices cabeceadoras, punzones y cinceles. En la tabla 5.9 se proporciona otra diversidad de materiales para herramientas y dados que tiene toda una variedad de aplicaciones en la manufactura.

RESUMEN

- Las principales categorías de las aleaciones y los metales ferrosos son aceros al carbono, aceros aleados, aceros inoxidables y aceros para herramientas y dados. En general, su amplio rango de propiedades, disponibilidad y bajo precio los han colocado entre los materiales metálicos más útiles.
- Los procesos de fabricación de aceros involucran cada vez más las técnicas de función continua y refinamiento secundario, lo cual resulta en aceros de mayor calidad y en mayor eficiencia y productividad.
- Por lo general, los aceros al carbono se clasifican como aceros al bajo carbono (acero dulce), al medio carbono y al alto carbono. Los aceros aleados contienen varios elementos de aleación, en particular cromo, níquel y molibdeno.
- Los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) tienen bajo contenido de carbono y constan de un grano fino de ferrita como una fase y de una segunda fase de martensita y austenita. Los aceros microaleados y nanoaleados poseen un grano fino, son aceros de alta resistencia y baja aleación que aportan propiedades superiores sin necesidad de recibir tratamiento térmico.
- Los aceros inoxidables tienen cromo como principal elemento de aleación, se les llama inoxidables porque forman una capa de óxido de cromo de pasivación en su superficie. Estos aceros se clasifican generalmente como aceros austeníticos, ferríticos, martensíticos y aceros endurecidos por precipitación.

TABLA 5.9

Procesos metalúrgicos típicos en los materiales para herramientas y dados	
Proceso	Material
Fundición por inyección	H13, P20
Metalurgia de polvos	
Punzones	A2, S7, D2, D3, M2
Dados	WC, D2, M2
Moldes para plásticos y caucho	S1, O1, A2, D2, 6F5, 6F6, P6, P20, P21, H13
Forjado en caliente	6F2, 6G, H11, H12
Extrusión en caliente	H11, H12, H13, H21
Cabeceado en frío	W1, W2, M1, M2, D2, WC
Extrusión en frío	
Punzones	A2, D2, M2, M4
Dados	O1, W1, A2, D2
Acuñado	52100, W1, O1, A2, D2, D3, D4, H11, H12, H13
Trefilado	
Alambres	WC, diamante
Perfiles	WC, D2, M2
Barras y tubos	WC, W1, D2
Laminados	
Laminado	Hierro fundido, acero fundido, acero forjado, WC
Peinado de roscas	A2, D2, M2
Rechazado al corte	A2, D2, M3
Láminas metálicas	
Cizallado en frío	D2, A2, A9, S2, S5, S7
Cizallado en caliente	H11, H12, H13
Trabajo en prensa mecánica	Aleaciones de zinc, acero 4140, hierro fundido, materiales epóxicos compósitos, A2, D2, O1
Embutido profundo	W1, O1, hierro fundido, A2, D2
Maquinado	Carburos, aceros de alta velocidad, cerámicos, diamante, nitruro de boro cúbico

Notas: por lo general, los materiales para herramientas y dados son endurecidos a HRC 55-65 para trabajo en frío y HRC 30-55 para trabajo en caliente. Los aceros para herramientas y dados contienen uno o más de los siguientes elementos de aleación principales: cromo, molibdeno, tungsteno y vanadio (para mayores detalles, consulte la bibliografía listada al final de este capítulo).

- Los aceros para herramientas y dados se encuentran entre los materiales metálicos más importantes y se utilizan ampliamente en la fundición, el formado y las operaciones de maquinado. Por lo general, son aceros de alta velocidad, aceros para trabajo en caliente y en frío y aceros resistentes a los impactos.

TÉRMINOS CLAVE

Acero	Aceros de alta resistencia y baja aleación	Aceros TRIP	Horno de hogar abierto
Acero calmado	Aceros de fase compleja	Aceros TWIP	Horno eléctrico
Acero efervescente	Aceros inoxidables	Alto horno	Lingote
Acero inoxidable martensítico	Aceros microaleados	Elementos en trazas	Refinamiento
Acero semicalmado	Aceros nanoaleados	Fundición continua	
Aceros al carbono	Aceros para herramientas y dados	Fundición en líneas	
Aceros aleados		Hierro cochino (arrabio)	
Aceros bifásicos		Horno básico al oxígeno	

BIBLIOGRAFÍA

- ASM *Handbook*, Vol. 1: **Properties and Selection: Iron, Steels, and High-Performance Alloys**, ASM International, 1990.
- ASM *Specialty Handbook*, **Carbon and Alloy Steels**, ASM International, 1995.
- ASM *Specialty Handbook*, **Stainless Steels**, ASM International, 1994.
- ASM *Specialty Handbook*, **Tool Materials**, ASM International, 1995.
- Beddoes, J. y Parr, J. G., **Introduction to Stainless Steels**, 3a. ed., ASM International, 1999.
- Bhadeshia, H. y Honeycombe, R., **Steels: Microstructure and Properties**, 3a. ed., Butterworth-Heinemann, 2006.
- Bryson, W. E., **Heat Treatment, Selection and Application of Tool Steels**, 2a. ed., Hanser Gardner, 2005.
- Krauss, G., **Steels: Processing, Structure, and Performance**, ASM International, 2005.
- Llewellyn, D. T. y Hudd, R. C., **Steels: Metallurgy and Applications**, 3a. ed., Butterworth-Heinemann, 1999.
- McGuire, M. F., **Stainless Steels for Design Engineers**, ASM International, 2008.
- Reed, C., **The Superalloys: Fundamentals and Applications**, Cambridge University Press, 2008.
- Roberts, G. A., Krauss, G. y Kennedy R., **Tool Steels**, 5a. ed., ASM International, 1998.
- Schneider, W., **Continuous Casting**, Wiley, 2006.

PREGUNTAS DE REPASO

- 5.1** ¿Cuáles son las principales categorías de las aleaciones ferrosas?
- 5.2** ¿Por qué el uso del acero es tan común?
- 5.3** Mencione las materias primas básicas utilizadas en la fabricación de hierro y acero y explique sus funciones.
- 5.4** Mencione los tipos de horno utilizados en la fabricación de acero y describa sus características.
- 5.5** Mencione y explique las características de los tipos de lingotes de acero.
- 5.6** ¿Qué significa refinamiento? ¿Cómo se hace?
- 5.7** ¿Qué es la fundición continua? ¿Qué ventajas tiene la fundición continua sobre el vaciado de lingotes?
- 5.8** ¿Cuál es el papel de un distribuidor en la fundición continua?
- 5.9** Mencione los cuatro elementos de aleación que tienen el mayor efecto sobre las propiedades de los aceros.
- 5.10** ¿Qué son los elementos en trazas?
- 5.11** ¿Cuáles son los porcentajes de contenido de carbono en los aceros al bajo carbono, al medio carbono y al alto carbono?
- 5.12** ¿Cómo se hacen inoxidables los aceros?
- 5.13** ¿Cuáles son los principales elementos de aleación presentes en los aceros para herramientas y dados y en los aceros de alta velocidad?
- 5.14** ¿Cómo puede afectar el cromo las características superficiales del acero inoxidable?
- 5.15** ¿Qué tipo de hornos se utilizan para refinar los aceros?
- 5.16** ¿Qué es el acero de alta velocidad?
- 5.17** ¿Qué son los aceros TRIP y TWIP?
- 5.18** ¿Cuáles son las aplicaciones de los aceros avanzados de alta resistencia?
- 5.19** ¿Qué características son comunes entre los aceros para dado o matrices?
- 5.20** ¿Qué efecto tiene el contenido de carbono sobre las propiedades mecánicas del acero? ¿Qué efectos tiene sobre sus propiedades físicas?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 5.21** Identifique varios productos diferentes que estén hechos de acero inoxidable y explique por qué se hacen de ese material.
- 5.22** Por lo general, los cocineros profesionales prefieren los cuchillos de acero al carbono que los de acero inoxidable, a pesar de que estos últimos son más populares entre los consumidores. Explique las razones de esa preferencia.
- 5.23** ¿Por qué es importante el control de la estructura de un lingote?
- 5.24** Explique por qué la fundición continua ha sido un avance tecnológico tan importante.
- 5.25** Describa aplicaciones en las que no sea recomendable utilizar aceros al carbono.
- 5.26** Explique qué ocurriría si la velocidad del proceso de fundición continua que se muestra en la figura 5.4a fuera (a) mayor o (b) menor que la indicada, típicamente 25 mm/s.
- 5.27** El costo de los productos laminados se incrementa al reducirse el grosor y el tamaño de la sección. Explique por qué.
- 5.28** Describa sus observaciones en relación con la información dada en la tabla 5.9.
- 5.29** ¿Cómo afectan los elementos en trazas la ductilidad de los aceros?
- 5.30** Comente sus observaciones en relación con la tabla 5.1.
- 5.31** En la tabla 5.9, se indica que el acero D2 es el metal para herramientas y dados más común en la mayoría de las aplicaciones. Explique por qué.

5.32 Mencione las impurezas comunes en el acero. ¿Cuáles de éstas son más propensas a minimizarse si el acero se funde en un horno de vacío?

5.33 Explique el propósito del aceite mostrado en la parte superior izquierda de la figura 5.4a dado que las temperaturas de fundido del acero están muy por encima de las temperaturas de ignición del aceite.

5.34 Investigaciones recientes han identificado texturas superficiales de los moldes que (a) inhiben la separación de un acero solidificado de su molde o bien (b) fuerzan al acero a

permanecer en contacto en una fundición continua. ¿Cuál es la ventaja de un molde que se mantiene en contacto estrecho con el acero?

5.35 Identifique productos que no puedan hacerse de acero y explique por qué es así. (Por ejemplo, los contactos eléctricos suelen estar hechos de oro o de cobre debido a que su blandura resulta en una baja resistencia del contacto, mientras que para el acero la resistencia del contacto sería muy alta).

5.36 Liste y explique las ventajas y desventajas del uso de los aceros avanzados de alta resistencia.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

5.37 Realice una búsqueda en internet y determine la composición química de (a) TRIP 450/800; (b) acero inoxidable 304 y (c) acero 4140. Si en una olla de traslado vaciamos 50 000 kg, calcule el peso de cada elemento presente en la olla.

5.38 Consulte la literatura disponible y haga una estimación del costo de las materias primas para (a) una lata de aluminio para bebidas, (b) una olla para cocina de acero inoxidable con capacidad para medio galón y (c) el cofre de acero de un automóvil.

5.39 En la tabla 5.1 aparece más de un tipo de acero para algunas aplicaciones. Consulte los datos disponibles en la literatura técnica que se lista en la bibliografía y determine el rango de propiedades de estos aceros en diversas condiciones, como trabajado en frío, trabajado en caliente y recocido.

5.40 Algunas bebidas están disponibles en latas de acero (con las tapas de aluminio) que lucen parecidas a las latas de aluminio. Consiga una de cada tipo, péselas vacías y determine sus respectivos espesores de pared.

5.41 Utilizando datos de resistencia y densidad, determine el peso mínimo de un elemento a tensión de 1 m de longitud que

debe soportar una carga de 4 kN fabricado a partir de (a) acero inoxidable 303 recocido, (b) acero 8620 normalizado, (c) acero 1080 laminado, (d) cualesquiera dos aleaciones de aluminio, (e) cualquier aleación de latón y (f) cobre puro.

5.42 El límite de resistencia a la fatiga del acero es aproximadamente la mitad de su resistencia máxima a la tensión (vea la figura 2.16), pero nunca superior a 700 MPa (100 ksi). Para el hierro, el límite de resistencia es 40% de la resistencia máxima a la tensión, pero nunca superior a 170 MPa (24 ksi). Grafique el límite de resistencia contra la resistencia máxima a la tensión de los aceros descritos en este capítulo y de los hierros fundidos mostrados en la tabla 12.3. En la misma gráfica, muestre el efecto del acabado superficial graficando el límite de resistencia a la fatiga, suponga que el material se encuentra en su condición de fundición (vea la figura 2.29).

5.43 Usando los datos de la tabla 5.4, obtenga las curvas de la ley de potencia para los aceros avanzados de alta resistencia mostrados y grafique las curvas. Compare estos materiales con los listados en la tabla 2.3.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

5.44 Con base en la información dada en la sección 5.5.1, haga una tabla con columnas para cada propiedad mejorada, como la templabilidad, la resistencia, la tenacidad y la maquinabilidad. En cada columna, liste los elementos que mejoren esa propiedad en particular e identifique el elemento que tenga la mayor influencia.

5.45 Suponga que usted está a cargo de las relaciones públicas de una gran compañía productora de acero. Describa todas las características atractivas de los aceros sobre las cuales sus clientes deberían ser informados.

5.46 Suponga que usted está en competencia con la industria del acero y se le pide una lista de todas las características no atractivas de los aceros. Haga una lista de dichas características y explique su importancia para las aplicaciones de ingeniería.

5.47 En la sección 5.5.1 se destacaron los efectos de varios elementos individuales, como el plomo o el azufre, sobre las propiedades y características de los aceros. Sin embargo, no se analizó el papel de las combinaciones de estos elementos (como

el plomo y el azufre en conjunto). Revise la documentación técnica y prepare una tabla que indique los efectos combinados de varios elementos sobre los aceros.

5.48 En el pasado, los cazadores de aves acuáticas utilizaban perdigones de plomo en sus escopetas, pero esta práctica dio lugar a la intoxicación por plomo de las aves sobrevivientes por la ingesta de perdigones de plomo (junto con gravilla) para ayudarse a digerir los alimentos. Ahora se utilizan el acero y el tungsteno como materiales sustitutos. Si todos los perdigones tienen la misma velocidad al salir del cañón de la escopeta, ¿qué preocupaciones tendría usted con respecto a esta sustitución de materiales? Considere tanto el desempeño como los efectos ambientales.

5.49 El aluminio se está utilizando como un material sustituto del acero en los automóviles. Describa sus preocupaciones, si tiene alguna, sobre adquirir un automóvil de aluminio.

5.50 En la década de 1940 (durante la Segunda Guerra Mundial), el barco *Yamato* y su buque gemelo, el *Musashi*, fueron los mayores buques de guerra jamás construidos. Averigüe el

peso de estas naves y estime el número de automóviles que podrían haberse construido con el acero utilizado en sólo uno de esos buques. Estime el tiempo requerido para fundir todo ese acero mediante fundición continua.

5.51 Consulte la literatura técnica y añada más piezas y materiales a los mostrados en la tabla 5.1.

5.52 En referencia a la figura 5.4a, observe que el molde incluye canales de enfriamiento para eliminar calor. ¿Es posible realizar la fundición continua sin esos canales de enfriamiento? ¿Puede hacerse con un molde calentado? Explique su respuesta.

6

Metales no ferrosos y sus aleaciones: producción, propiedades generales y aplicaciones

6.1	Introducción	150
6.2	Aluminio y aleaciones de aluminio	151
6.3	Magnesio y aleaciones de magnesio	155
6.4	Cobre y aleaciones de cobre	156
6.5	Níquel y aleaciones de níquel	158
6.6	Superalaciones	159
6.7	Titanio y sus aleaciones	160
6.8	Metales refractarios y sus aleaciones	161
6.9	Berilio	162
6.10	Circonio	162
6.11	Aleaciones de bajo punto de fusión	162
6.12	Metales preciosos	164
6.13	Aleaciones con memoria de forma (materiales inteligentes)	164
6.14	Aleaciones amorfas (vidrios metálicos)	165
6.15	Espumas metálicas	165

CASO DE ESTUDIO:

6.1	Un automóvil totalmente de aluminio	154
-----	-------------------------------------	-----

- Los metales no ferrosos incluyen una amplia variedad de materiales, desde el aluminio hasta el zinc, con propiedades especiales que son indispensables en la mayoría de los productos.
- En este capítulo se presenta cada una de las clasificaciones de metales no ferrosos y sus aleaciones y se describen brevemente sus métodos de producción.
- Después se resumen sus propiedades físicas y mecánicas junto con las directrices generales para su selección y aplicaciones.
- También se describen las aleaciones con memoria de forma, aleaciones amorfas y espumas metálicas con ejemplos de sus aplicaciones únicas.

6.1 Introducción

Los metales no ferrosos y sus aleaciones abarcan un rango muy amplio, desde los metales más comunes (como aluminio, cobre y magnesio) hasta aleaciones de alta resistencia y alta temperatura (como las de tungsteno, tantalio y molibdeno). Aunque los metales no ferrosos suelen ser más caros que los metales ferrosos (tabla 6.1), los primeros tienen numerosas aplicaciones importantes debido a propiedades como su buena resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, baja densidad y facilidad de fabricación (tabla 6.2).

Algunos ejemplos típicos de aplicaciones de metales no ferrosos y sus aleaciones son el aluminio para utensilios de cocina y fuselajes de avión, el cobre para cables de energía eléctrica, el zinc para láminas metálicas galvanizadas que se usan en las carrocerías de automóvil, el titanio para los álabes de las turbinas en los motores a reacción y para implantes ortopédicos y el tantalio para componentes de los motores de cohetes. Como un ejemplo específico, el motor turbofan (figura 6.1) del avión Boeing 757 contiene típicamente las siguientes aleaciones y metales no ferrosos: 38% de Ti, 37% de Ni, 12% de Cr, 6% de Co, 5% de Al, 1% de Nb y 0.02% de Ta.

Este capítulo presenta las propiedades generales, los métodos de producción y las aplicaciones de ingeniería importantes para los metales no ferrosos y sus aleaciones. Las propiedades de manufactura de estos materiales (como maquinabilidad, formabilidad y soldabilidad) se describen en diversos capítulos a lo largo de este texto.

6.2 Aluminio y aleaciones de aluminio

Las características importantes del aluminio (Al) y sus aleaciones son altas relaciones de resistencia sobre peso, resistencia a la corrosión por muchos productos químicos, alta conductividad térmica y eléctrica, no toxicidad, reflexividad, apariencia y facilidad de formabilidad y maquinabilidad; también son materiales no magnéticos.

Los principales usos del aluminio y sus aleaciones, en orden decreciente de consumo, están en los envases y embalajes (latas de aluminio para bebidas y papel aluminio), aplicaciones arquitectónicas y estructurales, transporte (aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales, autobuses, automóviles, vagones de ferrocarril y barcos), aplicaciones eléctricas (como conductores eléctricos económicos y no magnéticos), bienes de consumo duraderos (como electrodomésticos, utensilios de cocina y muebles) y herramientas portátiles (tablas 6.3 y 6.4). Casi todo el cableado para la transmisión de alta tensión está hecho de aluminio.

En cuanto a sus componentes estructurales (de carga), 82% de un avión Boeing 747 y 70% de un avión 777 es aluminio. El Boeing 787 Dreamliner (puesto en servicio por primera vez a finales de 2012) es bien reconocido por su fuselaje de material compuesto reforzado con fibra de carbono, aunque todavía utiliza 20% de aluminio en peso comparado contra 15% de titanio. El chasis y los paneles de la carrocería del coupé Rolls Royce Phantom son de aluminio, lo que mejora las relaciones de resistencia a peso y rigidez torsional a peso de este automóvil.

Las aleaciones de aluminio están disponibles como productos de planta —es decir, como productos forjados o en bruto que adquieren diversas formas por laminación, extrusión, trefilado, forja y formado de láminas delgadas (capítulos 13 a 16). Existen lingotes de aluminio disponibles para su fundición, de igual manera que hay aluminio en polvo para aplicaciones de metalurgia de polvos (capítulo 17). La mayoría de las aleaciones de aluminio pueden maquinarse, formarse y soldarse con relativa facilidad.

TABLA 6.1

Costo aproximado por unidad de volumen de metales forjados y plásticos en relación con el costo del acero al carbono

Material	Costo relativo
Oro	30 000
Plata	600
Aleaciones de molibdeno	75-100
Níquel	20
Aleaciones de titanio	20-40
Aleaciones de cobre	8-10
Aleaciones de zinc	1.5-3.5
Aceros inoxidables	2-9
Aleaciones de magnesio	4-6
Aleaciones de aluminio	2-3
Aceros de baja aleación y alta resistencia	1.4
Hierro fundido gris	1.2
Acero al carbono	1
Nailon, acetales y hule de silicona*	1.1-2
Otros plásticos y elastómeros*	0.2-1

*Como compuestos de moldeo.

Nota: los costos varían significativamente con la cantidad de compra, la oferta y la demanda, el tamaño y la forma y por otros diversos factores.

TABLA 6.2

Características generales de los metales no ferrosos y sus aleaciones

Material	Características
Aleaciones no ferrosas	Más costosas que los aceros y los plásticos; amplio rango de propiedades mecánicas, físicas y eléctricas; buena resistencia a la corrosión; aplicaciones a altas temperaturas.
Aluminio	Sus aleaciones tienen alta relación de resistencia a peso; alta conductividad térmica y eléctrica; buena resistencia a la corrosión; buenas propiedades de manufactura.
Magnesio	Es el metal más ligero; buena relación de resistencia a peso.
Cobre	Alta conductividad eléctrica y térmica; buena resistencia a la corrosión; buenas propiedades de manufactura.
Superalaciones	Buena resistencia mecánica y resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas; pueden ser aleaciones con base hierro, cobalto y níquel.
Estaño	Buena resistencia a la corrosión y aspecto brillante; se utiliza también en soldaduras y como material de soporte.
Titanio	Tiene la relación de resistencia a peso más alta de todos los metales; buena resistencia mecánica y resistencia a la corrosión a altas temperaturas.
Metales refractarios	Molibdeno, niobio, tungsteno y tantalio; alta resistencia a temperaturas elevadas.
Metales preciosos	Oro, plata y platino; generalmente tienen buena resistencia a la corrosión y características estéticas.
Zinc	Muy buena resistencia a la corrosión; de uso común en piezas de fundición y láminas de acero galvanizado para protección contra la corrosión.

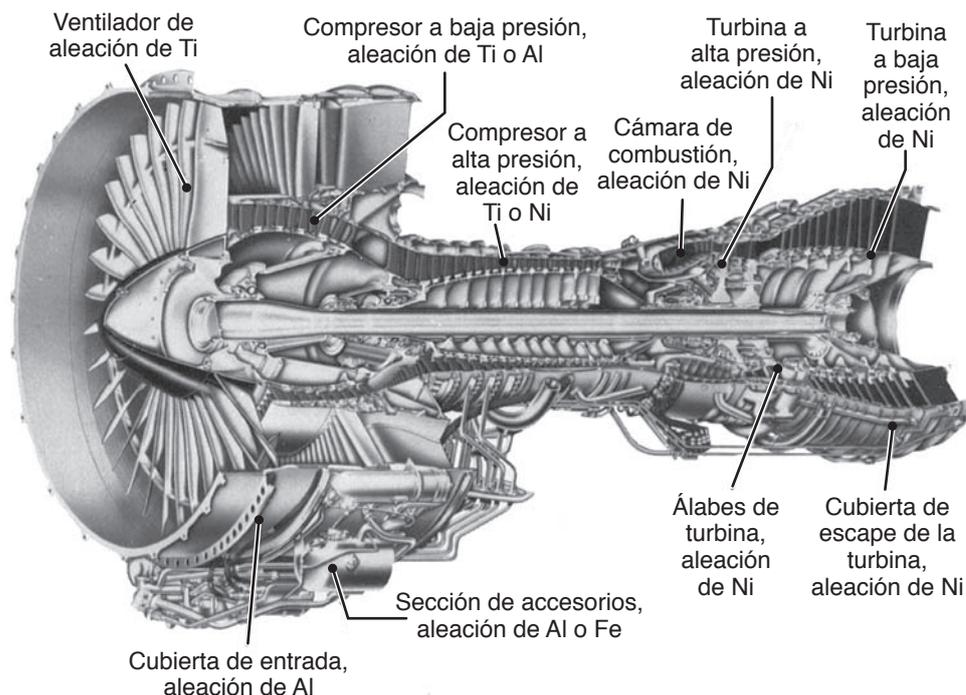


FIGURA 6.1 Sección transversal de un motor a reacción (PW2037) que muestra varios componentes y las aleaciones utilizadas en su manufactura. *Fuente:* Cortesía de United Aircraft Pratt & Whitney.

TABLA 6.3

Propiedades a temperatura ambiente de las aleaciones de aluminio seleccionadas

Aleación (UNS)	Temple	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)
1100 (A91100)	O	90	35	35-45
	H14	125	120	9-20
2024 (A92024)	O	190	75	20-22
	T4	470	325	19-20
3003 (A93003)	O	110	40	30-40
	H14	150	145	8-16
5052 (A95052)	O	190	90	25-30
	H34	260	215	10-14
6061 (A96061)	O	125	55	25-30
	T6	310	275	12-17
7075 (A97075)	O	230	105	16-17
	T6	570	500	11

Hay dos tipos de aleaciones forjadas de aluminio: (a) las aleaciones que pueden endurecerse por tratamiento mecánico y no pueden tratarse térmicamente y (b) las aleaciones que se pueden endurecer mediante tratamiento térmico.

Sistema de Numeración Unificado. Como en el caso de los aceros, el aluminio y otros metales y aleaciones no ferrosas se identifican internacionalmente por medio del Sistema de Numeración Unificado (UNS, por sus siglas en inglés), el cual consiste en una letra,

TABLA 6.4

Características de manufactura y aplicaciones típicas de las aleaciones de aluminio forjado seleccionadas				
Aleación	Características*			Aplicaciones típicas
	Resistencia a la corrosión	Maquinabilidad	Soldabilidad	
1100	A	C-D	A	Trabajo con lámina metálica, utensilios fabricados por rechazado, envases.
2024	C	B-C	B-C	Ruedas para camión, productos de máquinas generadoras de roscas, estructuras de aeronaves.
3003	A	C-D	A	Utensilios de cocina, equipamiento químico, recipientes a presión, trabajo con láminas metálicas, ferretería para la construcción, tanques de almacenamiento.
5052	A	C-D	A	Trabajo con láminas metálicas, tubos y accesorios hidráulicos; usos en autobuses, camiones y barcos.
6061	B	C-D	A	Estructuras de servicio pesado en las que se necesita resistencia a la corrosión; estructuras de camiones y barcos, vagones de ferrocarril, muebles, tuberías, guardas para puentes, tuberías hidráulicas.
7075	C	B-D	D	Aviones y otras estructuras, llaves, accesorios hidráulicos.

*A, excelente; D, deficiente.

que indica la clase general de la aleación, seguida de cinco dígitos, que indican su composición química. Por ejemplo, A es para el aluminio, C para el cobre, N para las aleaciones de níquel, P para los metales preciosos y Z para el zinc; en la designación UNS, la aleación de aluminio forjado 2024 es A92024.

Producción. El aluminio se produjo por primera vez en 1825. Es el elemento metálico más abundante, constituye aproximadamente el 8% de la corteza terrestre y se produce en una cantidad sólo superada por la del hierro. La principal mena para el aluminio es la *bauxita*, un óxido de aluminio hidratado (contiene agua) que incluye otros diversos óxidos. Después de eliminar la arcilla y suciedad mediante lavado, el mineral se tritura hasta la forma de polvo y se trata con sosa cáustica caliente (hidróxido de sodio) para eliminar las impurezas. A continuación, se extrae la alúmina (óxido de aluminio) de esta solución y después se disuelve en un baño de fluoruro de sodio y fluoruro de aluminio fundidos a una temperatura de entre 940 y 980 °C (1725 y 1800 °F). Enseguida, esta mezcla se somete a electrólisis de corriente directa. El metal de aluminio se forma en el cátodo (polo negativo), mientras que en el ánodo (polo positivo) se libera oxígeno. El *aluminio comercialmente puro* contiene hasta 99.99% de Al. El proceso de producción consume una gran cantidad de electricidad, lo cual contribuye significativamente al costo del aluminio.

Aluminio poroso. Se producen bloques de *aluminio poroso* que son 37% más ligeros que los de aluminio sólido y tienen permeabilidad uniforme (*microporosidad*). Esta característica permite su uso en aplicaciones donde debe mantenerse un diferencial de presión o vacío. Algunos ejemplos son: (a) conservación del vacío en accesorios para ensamble y automatización (sección 37.8) y (b) formado al vacío o termoformado de plásticos (sección 19.6). Entre 70 y 90% de estos bloques de aluminio poroso es polvo de aluminio y el resto es resina epóxica. Pueden maquinarse con relativa facilidad y unirse mediante adhesivos.

CASO DE ESTUDIO 6.1 Un automóvil totalmente de aluminio

El uso del aluminio en automóviles y camiones ligeros ha aumentado en forma constante. Recientemente, alrededor 1990, no se producían automóviles de pasajeros con estructura de aluminio; pero en 1997 había siete, incluyendo el Plymouth Prowler y el Audi A8 (figura

6.2). Con un ahorro en peso de hasta 47% con respecto a los vehículos de acero, estos automóviles consumen menos combustible, generan menos contaminación y son reciclables.



(a)



(b)

FIGURA 6.2 (a) Estructura de carrocería hecha de aluminio que muestra varios componentes fabricados mediante procesos de extrusión, formado de láminas y fundición. (b) Automóvil Audi A8 que tiene una estructura de carrocería hecha de aluminio. *Fuente:* (a) Cortesía del National Institute of Standards and Technology.

Debieron desarrollarse nuevas aleaciones y metodologías de diseño y manufactura para permitir el uso del aluminio en automóviles. Por ejemplo, los procedimientos de unión adhesiva y soldadura tenían que refinarse, el diseño de la estructura del chasis se tuvo que optimizar y debieron desarrollarse nuevos diseños de herramientas. Gracias a estas nuevas tecnologías se lograron los ahorros ambientales deseados sin que

fueran acompañados por una disminución en el rendimiento o la seguridad. De hecho, el Audi A8 fue el primer automóvil de lujo en obtener una calificación de cinco estrellas dual (máxima seguridad) en los asientos del conductor y el pasajero delantero por parte del programa de evaluación de vehículos nuevos de la National Highway Transportation Safety Administration (NHTSA, por sus siglas en inglés).

6.3 Magnesio y aleaciones de magnesio

El magnesio (Mg) es el metal de ingeniería más ligero y tiene buenas características de amortiguación de vibraciones. Sus aleaciones se utilizan en aplicaciones estructurales y no estructurales donde el peso tiene una importancia primordial. El magnesio también es un elemento de aleación en diversos metales no ferrosos.

Los usos típicos de las aleaciones de magnesio se encuentran en componentes de aviones y de misiles, equipos para manejo de materiales, herramientas eléctricas portátiles, escaleras de mano, equipajes, bicicletas, artículos deportivos y componentes ligeros generales. De igual forma que el aluminio, el magnesio está encontrando mayor uso en el sector automotriz, principalmente con el fin de lograr ahorros en peso. Las aleaciones de magnesio están disponibles como piezas de fundición (por ejemplo en los marcos de cámara hechos con el proceso de fundición con dados) o como productos en bruto (por ejemplo en barras y perfiles extruidos, piezas forjadas y placas y hojas laminadas). Las aleaciones de magnesio también se utilizan en la maquinaria textil y de impresión para reducir al mínimo las fuerzas inerciales en los componentes de alta velocidad.

Debido a que no es lo suficientemente resistente en su forma pura, el magnesio forma aleaciones con diversos elementos (tabla 6.5) para impartirle ciertas propiedades específicas; en particular, una alta relación de resistencia a peso. Una variedad de aleaciones de magnesio tienen buenas características de fundición, formado y maquinado. Sin embargo, debido a que se oxidan rápidamente (es decir, son *pirofóricas*), existe peligro de incendio y, por lo tanto, es necesario tomar precauciones al maquinar, rectificar o fundir en arena las aleaciones de magnesio. Los productos hechos de magnesio y sus aleaciones no presentan peligro de incendio durante su uso normal.

El magnesio es fácil de fundir, pero difícil de conformar. Se han hecho esfuerzos para promover un aumento del uso del magnesio en automóviles, mejorando las soldaduras y la formabilidad de láminas. En la actualidad, las aleaciones ZEK100, AZ31 y ZE10 son de gran interés.

TABLA 6.5

Propiedades y formas típicas de las aleaciones de magnesio forjadas seleccionadas						
Aleación	Composición promedio	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Formas típicas
AZ31B	3.0 Al, 1.0 Zn, 0.2 Mn	F	260	200	15	Extrusiones
		H24	290	220	15	Láminas y placas
AZ80A	8.5 Al, 0.5 Zn, 0.2 Mn	T5	380	275	7	Extrusiones y forjados
HK31A	0.7 Zr, 3 Th	H24	255	200	8	Láminas y placas
ZE10	1.0 Zn, 1.0 Ce	F	263	163	16	Láminas y placas
ZEK199	1.0 Zn, 0.3 Zr, 1.0 Ce	F	311	308	19	Extrusiones y láminas
ZK60A	5.7 Zn, 0.55 Zr	T5	365	300	11	Extrusiones y forjados

Producción. El magnesio es el tercer elemento metálico más abundante (2%) en la corteza terrestre, después del hierro y el aluminio. La mayor parte del magnesio proviene del agua de mar, que contiene 0.13% de magnesio, en forma de cloruro de magnesio. Producido por primera vez en 1808, el metal de magnesio puede obtenerse electrolíticamente o por reducción térmica. En el *método electrolítico*, el agua de mar se mezcla con cal (hidróxido de calcio) en tanques de sedimentación. El hidróxido de magnesio se precipita hasta el fondo, se filtra y se mezcla con ácido clorhídrico. La solución resultante se somete a electrólisis (como se hace con el aluminio), produciendo metal de magnesio, el cual se funde en lingotes para su posterior procesamiento en diversas formas.

En el *método de reducción térmica*, las menas de magnesio (dolomita, magnesita y otras rocas) se rompen con agentes reductores (como ferrosilicio en polvo, una aleación de hierro y silicio) mediante calentamiento de la mezcla en una cámara de vacío. Como resultado de esta reacción, se forman vapores de magnesio que se condensan en cristales de magnesio y después se funden, refinan y vierten en lingotes para su posterior procesamiento en diversas formas.

6.4 Cobre y aleaciones de cobre

.....

Producido por primera vez aproximadamente en el año 4000 a. C., el **cobre** (Cu, del latín *cuprum*) y sus aleaciones tienen propiedades algo similares a las del aluminio y sus aleaciones. Además tienen buena resistencia a la corrosión y están entre los mejores conductores de electricidad y calor (tablas 3.1 y 3.2). El cobre y sus aleaciones pueden procesarse con facilidad mediante diversas técnicas de formado, maquinado, fundición y unión.

Con frecuencia, las aleaciones de cobre resultan atractivas para aplicaciones en las que se requiere una combinación de cualidades eléctricas y mecánicas y que el material sea no magnético, resistente a la corrosión, térmicamente conductor y resistente al desgaste. Las aplicaciones incluyen componentes eléctricos y electrónicos, resortes, monedas, componentes de tuberías, intercambiadores de calor, equipos marinos y bienes de consumo (como utensilios de cocina, joyas y otros objetos decorativos). Aunque el aluminio es el material más común para los dados para inyección de plásticos (sección 19.3), el cobre se utiliza con frecuencia debido a que posee mejores propiedades térmicas. Además, el cobre puro puede utilizarse como un lubricante sólido en las operaciones de formado de metales en caliente (sección 33.7.6).

Las aleaciones de cobre pueden desarrollar una amplia variedad de propiedades mediante la adición de elementos de aleación y por tratamiento térmico para mejorar sus características de manufactura. Las aleaciones de cobre más comunes son los latones y bronce. El **latón** (una aleación de cobre y zinc) es una de las primeras aleaciones desarrolladas y tiene numerosas aplicaciones, incluyendo objetos decorativos (tabla 6.6). El **bronce** es una aleación de cobre y estaño (tabla 6.7); también se producen otros bronce como el bronce al aluminio (una aleación de cobre y aluminio) y los bronce al estaño. El cobre-berilio (o bronce al berilio) y el bronce fosforado tienen buena resistencia y dureza, sus aplicaciones comprenden resortes y rodamientos; otras aleaciones importantes de cobre son el cuproníquel y las platas al níquel.

Producción. El cobre se encuentra en diversas menas, siendo las más comunes las de sulfuro. Por lo general, los minerales son de baja ley y se obtienen en minas a cielo abierto. El mineral se muele formando partículas finas en molinos de bolas (cilindros giratorios con bolas de metal en su interior que trituran el mineral, como se ilustra en la figura 17.6b); después, las partículas resultantes se suspenden en agua para formar una suspensión. Luego se añaden productos químicos y petróleo y la mezcla se agita. Las partículas minerales forman una *espuma* que se recoge y se seca. Tradicionalmente, el concentrado de cobre seco (del cual un tercio es cobre) se **funde** (en inglés *smelted*),

TABLA 6.6

Propiedades y aplicaciones típicas del cobre forjado y los latones seleccionados					
Tipo y número UNS	Composición promedio (%)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones típicas
Cobre electrolítico (C11000)	99.90 Cu, 0.04 O	220-450	70-365	55-4	Canaletas, canalones (medias cañas), techados, juntas, radiadores de automóvil, barras para buses (colectoras), clavos, rodillos de impresión, remaches.
Latón rojo, 85% (C23000)	85.0 Cu, 15.0 Zn	270-725	70-435	55-3	Recubrimientos para intemperie, ductos, enchufes, elementos de sujeción, extintores, tuberías de condensador y de intercambiadores de calor.
Latón para cartuchos, 70% (C26000)	70.0 Cu, 30.0 Zn	300-900	75-450	66-3	Núcleos y depósitos de radiador, carcasas de linternas, accesorios de lámparas, elementos de sujeción, cerraduras, bisagras, componentes de municiones, accesorios de plomería.
Latón de libre maquinado (C36000)	61.5 Cu, 3.0 Pb, 35.5 Zn	340-470	125-310	53-18	Engranajes, piñones, piezas para máquinas automáticas generadoras de tornillos de alta velocidad.
Latón naval (C46400 a C46700)	60.0 Cu, 39.25 Zn, 0.75 Sn	380-610	170-455	50-17	En aviones: tensores, balines, pernos; en equipo marino: ejes de transmisión, remaches, vástagos de válvula, placas de condensador.

TABLA 6.7

Propiedades y aplicaciones típicas de los bronce forjados seleccionados					
Tipo y número UNS	Composición promedio (%)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones típicas
Bronce arquitectónico (C38500)	57.0 Cu, 3.0 Pb, 40.0 Zn	415 (en condición extruida)	140	30	Extrusiones arquitectónicas, escarparates, molduras para pisos, molduras, topes, bisagras.
Bronce fosforado, 5% A (C51000)	95.0 Cu, 5.0 Sn, trace P	325-960	130-550	64-2	Fuelles, discos de embrague, clavijas, diafragmas, dispositivos de sujeción, cepillos de alambre, equipo químico, maquinaria textil.
Bronce fosforado de libre maquinado (C54400)	88.0 Cu, 4.0 Pb, 4.0 Zn, 4.0 Sn	300-520	130-435	50-15	Cojinetes, bujes, engranajes, piñones, ejes, arandelas de empuje y piezas de válvulas.
Bronce al bajo silicio, B (C65100)	98.5 Cu, 1.5 Si	275-655	100-475	55-11	Líneas hidráulicas a presión, pernos, equipo marino, conductos eléctricos, tubos de intercambiadores de calor.
Alpaca o plata alemana, 65-10 (C74500)	65.0 Cu, 25.0 Zn, 10.0 Ni	340-900	125-525	50-1	Remaches, tornillos, sujetadores de presión, piezas huecas, placas de identificación.

y refina; este proceso es conocido como **pirometalurgia** porque se utiliza calor para refinar el metal. En aplicaciones como conductores eléctricos, el cobre se refina electroquímicamente hasta una pureza de al menos 99.95% (*cobre electrolítico libre de oxígeno OFEC*, por las siglas en inglés). El cobre también se procesa por **hidrometalurgia**, la cual involucra reacciones químicas y electrolíticas.

6.5 Níquel y aleaciones de níquel

El **níquel** (Ni) es un metal de color blanco plateado y un elemento de aleación importante entre los metales porque ofrece resistencia mecánica, tenacidad y resistencia a la corrosión; se utiliza ampliamente en aceros inoxidable y en aleaciones a base de níquel (también llamadas **superaleaciones**). Las aleaciones de níquel se utilizan en aplicaciones a altas temperaturas (como en componentes de motores de reacción, cohetes y centrales nucleares), equipos para la manipulación de alimentos y procesamiento químico, monedas y aplicaciones marinas. Debido a que el níquel es magnético, sus aleaciones se utilizan también en aplicaciones electromagnéticas, como los solenoides.

El uso principal del níquel como metal se da en la electrodeposición de piezas para mejorar su apariencia y resistencia a la corrosión y al desgaste. Las aleaciones de níquel tienen alta resistencia mecánica y resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas. Los elementos de aleación en el níquel son el cromo, cobalto y molibdeno. El comportamiento de las aleaciones de níquel en el maquinado, el formado, la fundición y la soldadura puede modificarse empleando otros diversos elementos de aleación.

Se ha desarrollado toda una variedad de aleaciones de níquel con un amplio rango de resistencias a diferentes temperaturas (tabla 6.8). Aunque los nombres comerciales siguen siendo de uso generalizado, las aleaciones de níquel se identifican en el sistema UNS con la letra N. Así, el Hastelloy G es N06007; otros nombres comerciales comunes son:

- **Monel**, aleación de níquel y cobre.
- **Hastelloy** (también es una aleación de níquel y cromo), tiene buena resistencia a la corrosión y alta resistencia a temperaturas elevadas.
- **Nicromo** (aleación de níquel, cromo y hierro), tiene alta resistencia eléctrica y alta resistencia a la oxidación, se utiliza para elementos de calefacción eléctrica.
- **Invar** y **Kovar** (aleaciones de hierro y níquel) tienen relativamente baja sensibilidad a los cambios de temperatura (sección 3.6).

Producción. Las fuentes principales de níquel son minerales de sulfuro y óxido, los cuales tienen bajas concentraciones de níquel. El metal se produce mediante procesos de sedimentación y térmicos seguidos por electrólisis; esta secuencia genera 99.95% de ní-

TABLA 6.8

Propiedades y aplicaciones típicas de las aleaciones de níquel seleccionadas (todos los nombres son comerciales)

Tipo y número UNS	Composición promedio (%)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones típicas
Níquel 200 (recocido)	–	380-550	100-275	60-40	Industria química y de procesamiento de alimentos, equipos aeroespaciales, componentes electrónicos.
Duraníquel 301 (endurecido por envejecimiento)	4.4 Al, 0.6 Ti	1300	900	28	Resortes, equipo para extrusión de plásticos, moldes para vidrio, diafragmas.
Monel R-405 (laminado en caliente)	30 Cu	525	230	35	Productos de máquinas roscadoras, piezas de medidores de agua.
Monel K-500 (endurecido por envejecimiento)	29 Cu, 3 Al	1050	750	30	Ejes de bomba, vástagos de válvula, resortes.
Inconel 600 (recocido)	15 Cr, 8 Fe	640	210	48	Piezas de turbinas a gas, equipos para tratamiento térmico, componentes electrónicos, reactores nucleares.
Hastelloy C-4 (tratado por solución y templado)	16 Cr, 15 Mo	785	400	54	Piezas que necesitan estabilidad a altas temperaturas y resistencia al agrietamiento por corrosión por esfuerzo.

quel puro. El níquel también está presente en el lecho marino en cantidades significativas, pero actualmente la minería submarina no aporta una producción importante de níquel.

6.6 Superalaciones

Las *superalaciones* son importantes en aplicaciones a altas temperaturas, por consiguiente, se conocen también como **aleaciones resistentes al calor o de alta temperatura**. Por lo general, las superalaciones tienen buena resistencia mecánica, térmica, a la fatiga por corrosión, al choque mecánico y térmico, a la termofluencia y a la erosión a temperaturas elevadas. Las aplicaciones más importantes de las superalaciones se encuentran en los motores a reacción y las turbinas a gas; otras aplicaciones son en motores recíprocos, motores de cohetes, herramientas y dados para el trabajo en caliente con metales y en las industrias nuclear, química y petroquímica.

Usualmente, las superalaciones se identifican mediante nombres comerciales o por sistemas especiales de numeración y están disponibles en toda una variedad de formas. La mayoría de las superalaciones tienen una temperatura máxima de servicio de alrededor de 1000 °C (1800 °F) en aplicaciones estructurales. Para los componentes que no soportan cargas, las temperaturas pueden ser hasta de 1200 °C (2200 °F).

Estas aleaciones se conocen como superalaciones *a base de hierro, a base de cobalto o a base de níquel*.

- Por lo general, las **superalaciones a base de hierro** contienen entre 32 y 67% de Fe, 15 y 22% de Cr y 9 y 38% de Ni. Las aleaciones comunes en este grupo pertenecen a la serie *Incoloy*.
- Usualmente, las **superalaciones a base de cobalto** contienen entre 35 y 65% de Co, 19 y 30% de Cr y hasta 35% de Ni. Éstas no son tan fuertes como las superalaciones a base de níquel, pero conservan su resistencia a temperaturas más altas.
- Las **superalaciones a base de níquel** son los más comunes de este tipo de aleaciones y están disponibles en un amplio rango de composiciones (tabla 6.9). La proporción de níquel está entre 38 y 76% y también contienen hasta 27% de Cr y 20% de Co. Las aleaciones comunes en este grupo pertenecen a las series *Hastelloy, Inconel, Nimonic, René, Udimet, Astroloy* y *Waspaloy*.

TABLA 6.9

Propiedades y aplicaciones típicas de las superalaciones (seleccionadas) a base de níquel, a 870 °C (1600 °F) (todos los nombres son comerciales)					
Aleación	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones típicas
Astroloy	Forjado	770	690	25	Piezas forjadas para uso a altas temperaturas.
Hastelloy X	Forjado	255	180	50	Partes de lámina para motores a reacción.
IN-100	Fundido	885	695	6	Paletas y ruedas para motores a reacción.
IN-102	Forjado	215	200	110	Piezas de sobrecalentador y motores a reacción.
Inconel 625	Forjado	285	275	125	Motores y estructuras de avión, equipos de procesamiento químico.
Inconel 718	Forjado	340	330	88	Motores a reacción y piezas de cohete.
MAR-M 200	Fundido	840	760	4	Álabes de motores a reacción.
MAR-M 432	Fundido	730	605	8	Ruedas de turbina completamente fundidas.
René 41	Forjado	620	550	19	Piezas de motores a reacción.
Udimet 700	Forjado	690	635	27	Piezas de motores a reacción.
Waspaloy	Forjado	525	515	35	Piezas de motores a reacción.

6.7 Titanio y sus aleaciones

El **titanio** (Ti, nombrado así en honor al dios griego Titán) es un metal de color blanco plateado que se descubrió en 1791, pero no se produjo comercialmente sino hasta la década de 1950. Aunque el titanio es caro, su alta relación de resistencia a peso y su resistencia a la corrosión a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas lo hacen atractivo para numerosas aplicaciones, incluyendo aviones, motores a reacción (vea la figura 6.1), automóviles de carreras, palos de golf, productos químicos, petroquímicos y componentes marinos, corazas) de submarinos, placas de armadura y aplicaciones médicas, como implantes ortopédicos (tabla 6.10). Las aleaciones de titanio pueden utilizarse para servicio a 550 °C (1000 °F) durante largos periodos y hasta 750 °C (1400 °F) durante periodos más cortos.

El titanio no aleado, conocido como *titanio comercialmente puro*, tiene una excelente resistencia a la corrosión para aplicaciones donde las consideraciones de resistencia son secundarias. El aluminio, vanadio, molibdeno, manganeso y otros elementos de aleación le imparten propiedades especiales en la mejora de la resistencia, el trabajado mecánico y la templabilidad.

Las propiedades y características de manufactura de las aleaciones de titanio son extremadamente sensibles a pequeñas variaciones en los elementos de aleación y residuales. Por lo tanto, el control de la composición y del procesamiento resultan importantes, en especial la prevención de la contaminación superficial por hidrógeno, oxígeno o nitrógeno durante el procesamiento. Estos elementos causan la fragilización del titanio y, por consiguiente, reducen su tenacidad y ductilidad.

La estructura cúbica centrada en el cuerpo del titanio (*beta-titanio*) está por encima de 880 °C (1600 °F) y es dúctil, mientras que su estructura hexagonal compacta (*alfa-titanio*) es algo frágil y muy sensible a la corrosión por esfuerzo. Es posible obtener una variedad de otras estructuras (alfa, casi-alfa, alfa-beta y beta) mediante la aleación y el tratamiento térmico, por lo que las propiedades pueden optimizarse para aplicaciones específicas. Los compuestos **intermetálicos de aluminio de titanio** (TiAl y Ti₃Al, vea la sección 4.2.2) tienen mayor rigidez y menor densidad que las aleaciones de titanio convencionales y pueden soportar temperaturas más altas.

Producción. Los minerales que contienen titanio se reducen primero a tetracloruro de titanio en un horno de arco eléctrico, luego se convierten en cloruro de titanio en una atmósfera de cloro. El compuesto se reduce aún más a metal de titanio por destilación y lixiviación (disolución). Esta secuencia forma *titanio esponjoso* que después se prensa en briquetas, se funde y vierte en lingotes para luego ser procesado en diversas formas. La complejidad de estas operaciones termoquímicas de múltiples pasos (*proceso Kroll*, en

TABLA 6.10

Propiedades y aplicaciones típicas de las aleaciones de titanio forjado seleccionadas, a diferentes temperaturas

Número UNS	Composición promedio (%)	Condición	Temperatura (°C)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Elongación (%)	Reducción de área (%)
R50250	99.5 Ti	Recocido	25	330	240	30	55
			300	150	95		
R54520	5 Al, 2.5 Sn	Recocido	25	860	810	16	40
			300	565	450		
R56400	6 Al, 4 V	Recocido	25	1000	925	14	30
			300	725	650		
		Solución + envejecimiento	25	1175	1100	10	20
			300	980	900		
R58010	13 V, 11 Cr, 3 Al	Solución + envejecimiento	25	1275	1210	8	—
			425	1100	830		

honor al metalúrgico luxemburgués W. J. Kroll) aumenta considerablemente el costo del titanio. La evolución reciente de los procesos de extracción electroquímica han reducido el número de pasos involucrados y el consumo de energía; lo que a su vez reduce el costo de producción del titanio.

6.8 Metales refractarios y sus aleaciones

Existen cuatro **metales refractarios**: molibdeno, niobio, tungsteno y tantalio; se les llama *refractarios* debido a sus altos puntos de fusión y son importantes elementos de aleación en los aceros y las superaleaciones. Los metales refractarios mantienen su resistencia a temperaturas elevadas más que la mayoría de los otros metales y aleaciones; por lo tanto, son de gran importancia en motores de cohete, turbinas a gas y en otras diversas aplicaciones aeroespaciales, así como en las industrias electrónica, de energía nuclear y química y en los materiales de herramientas y dados. El rango de temperatura para algunas de estas aplicaciones está en el orden de 1100 a 2200 °C (2000 a 4000 °F), donde la resistencia y la oxidación son de mayor preocupación.

6.8.1 Molibdeno

El **molibdeno** (Mo, término de origen griego que significa plomo) es un metal de color blanco platinado que tiene un punto de fusión alto, alto módulo de elasticidad, buena resistencia al choque térmico y buena conductividad eléctrica y térmica. El molibdeno se utiliza en mayor cantidad que cualquier otro metal refractario en aplicaciones como cohetes de combustible sólido, motores a reacción, estructuras en panel, componentes electrónicos, elementos de calefacción y dados para fundición a presión. Los principales elementos de aleación son el titanio y el circonio. El molibdeno por sí solo también es un elemento de aleación importante en aleaciones de acero fundidas y forjadas, así como en aleaciones resistentes al calor, ofreciendo resistencia mecánica, tenacidad y resistencia a la corrosión. Una limitación importante de las aleaciones de molibdeno es su baja resistencia a la oxidación a temperaturas superiores a 500 °C (950 °F), por lo cual necesitan revestimientos protectores.

Producción. La fuente principal de molibdeno es el mineral *molibdenita* (disulfuro de molibdeno). Primero se procesa el mineral para concentrar el molibdeno; luego éste se reduce químicamente, primero con oxígeno y después con hidrógeno. También se usan técnicas de metalurgia de polvos con el fin de producir lingotes para su posterior procesamiento en diversas formas.

6.8.2 Niobio (columbio)

El **niobio** (Nb, por niobium, en honor a Niobe, la hija del mítico rey griego Tántalo), también llamado **columbio** (debido a su mineral de origen, la *columbita*), posee buena ductilidad y maleabilidad y tiene mayor resistencia a la oxidación que otros metales refractarios. Con varios elementos de aleación, las aleaciones de niobio pueden tener una resistencia moderada y buenas características de fabricación. Estas aleaciones se utilizan generalmente en cohetes y misiles y en aplicaciones nucleares, químicas y de superconductores. El niobio es también un elemento aleado en diferentes aleaciones y superaleaciones. El metal se procesa mediante reducción y refinamiento de minerales y, a partir de polvos, por medio de fusión y conformado en lingotes.

6.8.3 Tungsteno

El **tungsteno** (W, por *wolframio*, su nombre europeo, en referencia a su mineral de origen la *wolframita*; en sueco, *tung* significa “pesado” y *sten* “piedra”) es el más

abundante de todos los metales refractarios. El tungsteno tiene el punto de fusión más alto de todos los metales (3410 °C, 6170 °F) y se caracteriza por su alta resistencia a temperaturas elevadas. Sin embargo, tiene alta densidad por lo que se utiliza para el balanceo de pesos y contrapesos en los sistemas mecánicos, incluyendo los relojes de cuerda automáticos. Es frágil a bajas temperaturas y tiene poca resistencia a la oxidación. Como elemento de aleación, el tungsteno ofrece buena resistencia a temperaturas elevadas y dureza a los aceros.

Las aleaciones de tungsteno se utilizan en aplicaciones que consideran temperaturas superiores a 1650 °C (3000 °F), como recubrimientos de las boquillas en toberas (de los propulsores) de misiles y motores de cohete, cortacircuitos, electrodos de soldadura, herramientas para el maquinado por descarga eléctrica y electrodos de bujía. El carburo de tungsteno, con cobalto como aglutinante para las partículas de carburo, es uno de los materiales más importantes para herramientas y dados. El tungsteno se procesa por descomposición química a partir de concentrados de mineral, después se reduce y procesa adicionalmente mediante técnicas de metalurgia de polvos en una atmósfera de hidrógeno.

6.8.4 Tantalio

El **tantalio** (Ta, en honor al mítico rey griego Tántalo) se caracteriza por su alto punto de fusión (3000 °C, 5425 °F), alta densidad, buena ductilidad y resistencia a la corrosión; sin embargo, tiene poca resistencia química a temperaturas superiores a 150 °C (300 °F). El tantalio se usa ampliamente en los capacitores electrolíticos y en diversos componentes en las industrias eléctrica, electrónica y química. También se utiliza para aplicaciones térmicas, como en hornos e intercambiadores de calor resistentes a los ácidos. Existe una variedad de aleaciones a base de tantalio en diversas formas para su uso en misiles y aviones. El tantalio también se emplea como elemento de aleación. Se procesa mediante técnicas similares a las del procesamiento de niobio.

6.9 Berilio

El **berilio** (Be, por el mineral *berilo*), que es de color gris acero, tiene alta relación de resistencia a peso. El berilio aleado se usa en toberas (propulsores) de cohetes, estructuras espaciales y misiles, frenos de disco de aviones e instrumentos y espejos de precisión; también se utiliza en aplicaciones nucleares y de rayos X debido a su baja absorción de neutrones. El berilio es además un elemento de aleación y sus aleaciones con cobre y níquel se utilizan en diversas aplicaciones, incluyendo resortes (*cobre-berilio*), contactos eléctricos y herramientas que no forman chispas para su uso en entornos explosivos tales como las minas y la producción de polvos metálicos. El berilio y su óxido son tóxicos y deben manejarse de acuerdo con esta condición.

6.10 Circonio

El **circonio** (también **zirconio**) (Zr, por el mineral *circón* [del inglés: *zircon*]) tiene una apariencia plateada; posee buena resistencia mecánica y ductilidad a temperaturas elevadas y buena resistencia a la corrosión debido a una película de óxido adherente. El circonio se utiliza en componentes electrónicos y en aplicaciones de reactores nucleares de energía debido a su baja absorción de neutrones.

6.11 Aleaciones de bajo punto de fusión

Las **aleaciones de bajo punto de fusión** se llaman así debido a sus puntos de fusión relativamente bajos. Los metales más importantes incluidos en esta categoría son el plomo, zinc, estaño y sus aleaciones.

6.11.1 Plomo

El **plomo** (Pb, por *plumbum*, raíz latina de la palabra “plomero”) tiene las propiedades de alta densidad, resistencia a la corrosión (en virtud de la capa de óxido de plomo estable que se forma para proteger la superficie), blandura, baja resistencia mecánica, ductilidad y buena manejabilidad. Al alear el plomo con diversos elementos (como antimonio y estaño) se obtienen propiedades deseables, por lo que es adecuado para tuberías, tubos plegables, aleaciones para cojinetes (Babbitt), revestimiento de cables, papel metálico (tan delgado como 0.01 mm), techos y baterías de almacenamiento de plomo y ácido. El plomo también se utiliza para amortiguar vibraciones, como protección contra la radiación de rayos X, en municiones y como un lubricante sólido para las operaciones de formado metálico en caliente. Los artefactos de plomo más antiguos que se conocen fueron fabricados aproximadamente en el año 3000 a. C. Las tuberías de plomo hechas por los romanos, que se instalaron en los baños romanos de Bath, Inglaterra, hace dos mil años, todavía están en uso.

Debido a su toxicidad, se están haciendo grandes esfuerzos para sustituir el plomo por otros elementos, como en el caso de las *soldaduras sin plomo* (sección 32.3.1). La fuente más importante de mineral de plomo es la galena (PbS); ésta se extrae, se funde y refina mediante tratamientos químicos.

6.11.2 Zinc

El **zinc** (Zn, del latín *zincum*, aunque sus orígenes no son claros) tiene un color blanco azulado y es el cuarto metal más utilizado industrialmente, después de hierro, aluminio y cobre. Cuenta con tres usos principales: en el galvanizado de hierro, láminas de acero y alambres). En el hierro, las láminas de acero y los alambres galvanizados; como aleación en otros metales y como un metal de fundición. En el **galvanizado**, el zinc sirve como ánodo y protege al acero (cátodo) del ataque corrosivo que puede rayar o perforar el revestimiento. El zinc también se utiliza como elemento de aleación; por ejemplo, el latón es una aleación de cobre y zinc. En las aleaciones a base de zinc, los principales elementos de aleación son aluminio, cobre y magnesio, los cuales imparten resistencia y proporcionan control dimensional durante la fundición del metal.

Las aleaciones a base de zinc se utilizan ampliamente en la fundición a presión, para fabricar productos como bombas de combustible y parrillas para automóviles, en componentes para electrodomésticos como aspiradoras y lavadoras, en equipos de cocina, piezas para maquinaria y equipos de fotograbado. Otro uso del zinc se encuentra en las aleaciones superplásticas (sección 2.2.7). Un ejemplo común de una aleación de zinc superplástica es la lámina con 78% de Zn y 22% de Al, con un grano muy fino, que puede formarse utilizando los métodos para el conformado de plásticos o metales.

Producción. La fuente principal de mineral de zinc es el sulfuro de zinc, también denominado *blenda de zinc*. Primero, el mineral se tuesta al aire y se convierte en óxido de zinc. Después se reduce a zinc, ya sea electrolíticamente (usando ácido sulfúrico) o por calentamiento en un horno con carbón, lo cual provoca la separación del zinc fundido.

6.11.3 Estaño

El **estaño** (Sn, por el latín *stannum*) es un metal importante, aunque se usa en pequeñas cantidades en comparación con el hierro, el aluminio o el cobre. La mayor aplicación del estaño (un metal lustroso de color blanco plateado) es como capa protectora en las láminas de acero (*hojalata*) utilizadas en la fabricación de envases (*latas*) para alimentos y otros productos. La baja resistencia al corte de los recubrimientos de estaño sobre las láminas de acero mejora su capacidad de embutido profundo (sección 16.7.1). A diferencia de los aceros galvanizados, si este revestimiento se perfora o destruye, el acero se corroe debido a que el estaño es catódico.

El estaño no aleado se utiliza en aplicaciones como los revestimientos para plantas de destilación de agua y la capa de metal fundido en la producción de placas de vidrio flotado (sección 18.3.1). Las aleaciones a base de estaño (también llamadas **metales blancos**) suelen contener cobre, antimonio y plomo; estos elementos de aleación imparten dureza,

resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. El estaño por sí solo es un elemento de aleación para las aleaciones dentales y para el bronce (aleación de cobre y estaño), titanio y circonio. Las aleaciones de estaño y plomo son materiales comunes de soldadura (sección 32.3) con un amplio rango de composiciones y puntos de fusión.

Debido a sus bajos coeficientes de fricción (que resultan de su baja resistencia al corte y su baja adherencia), algunas aleaciones de estaño se utilizan como materiales de cojinetes y chumaceras. Conocidas como **babbitts** (en honor al orfebre estadounidense I. Babbitt, 1799-1862), estas aleaciones contienen estaño, cobre y antimonio. El **peltre**, una aleación de estaño, cobre y antimonio, se utiliza para elaborar utensilios de mesa, recipientes huecos y artefactos decorativos. Las aleaciones de estaño también se usan en la fabricación de tubos de órgano. El mineral de estaño más importante es la *casiterita* (óxido de estaño), que es de baja ley. Primero, el mineral se extrae, luego se concentra mediante diversas técnicas, se funde, refina y vacía en lingotes para su posterior procesamiento.

6.12 Metales preciosos

Los metales preciosos más importantes (en costo), también llamados metales nobles, son los siguientes:

- El **oro** (Au, del latín *aurum*) es blando y dúctil, tiene buena resistencia a la corrosión a cualquier temperatura. Las aplicaciones típicas incluyen joyería, monedas, reflectores, hojas de oro con fines decorativos, trabajo dental, electrodeposición y contactos y terminales eléctricos.
- La **plata** (Ag, del latín *argentum*) es dúctil y tiene los valores más altos de conductividad eléctrica y térmica (vea la tabla 3.2); sin embargo, desarrolla una película de óxido que afecta negativamente sus características superficiales y apariencia. Las aplicaciones típicas de la plata incluyen artículos de mesa, joyas, monedas, electrodeposición, soldaduras, recubrimientos de soporte y equipos para las industrias alimenticia y química. La *plata Sterling* es una aleación de plata y 7.5% de cobre.
- El **platino** (Pt) es un metal blando, dúctil, de color blanco grisáceo, que tiene buena resistencia a la corrosión, incluso a temperaturas elevadas. Las aleaciones de platino se utilizan como contactos eléctricos; en los electrodos de las bujías; como catalizadores de los dispositivos de control de la contaminación en automóviles; en filamentos y boquillas; en dados para fibras de vidrio (sección 18.3.4) en termopares y en joyería y trabajos dentales.

6.13 Aleaciones con memoria de forma (materiales inteligentes)

Las *aleaciones con memoria de forma* son únicas debido a que, luego de haberse deformado plásticamente en diversas formas a temperatura ambiente, vuelven a su forma original después de recibir calentamiento. Por ejemplo, un trozo de alambre recto hecho de un material de este tipo, puede enrollarse en la forma de un resorte helicoidal; cuando se calienta, el resorte se desenrolla y vuelve a su forma recta original. Las aleaciones con memoria de forma pueden utilizarse para generar movimiento y/o fuerza en actuadores sensibles a la temperatura. El comportamiento de estas aleaciones, también llamadas **materiales inteligentes**, puede ser reversible; es decir, la forma puede alternarse varias veces después de la aplicación y eliminación del calor.

Una aleación con memoria de forma típica tiene 55% de Ni y 45% de Ti (*Nitinol*); otras aleaciones son de cobre-aluminio-níquel, cobre-zinc-aluminio, hierro-manganeso-silicio y titanio-níquel-hafnio. Por lo general, las aleaciones con memoria de forma también tienen propiedades tales como una buena ductilidad, resistencia a la corrosión y alta conductividad eléctrica.

Las aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma incluyen sensores, prótesis para arterias bloqueadas (en inglés: *stents*), relevadores, bombas, interruptores, conectores,

abrazaderas, elementos de sujeción y sellos. Como un ejemplo, se ha construido una válvula de níquel-titanio para proteger a las personas de sufrir quemaduras en fregaderos, bañeras y duchas. Se instala directamente en el sistema de tuberías y detiene el flujo de agua con un goteo de al menos 3 segundos después de que la temperatura del agua alcanza 47 °C (116 °F). Los desarrollos más recientes incluyen aleaciones con memoria de forma en películas delgadas depositadas sobre sustratos de silicio pulido para su uso en dispositivos microelectromecánicos (MEMS, por su término en inglés; Microelectromechanical systems).

6.14 Aleaciones amorfas (vidrios metálicos)

Algunas aleaciones metálicas que, a diferencia de los metales, no tienen una estructura cristalina de largo alcance, se denominan **aleaciones amorfas**; no tienen límites de grano y sus átomos se compactan aleatoriamente y de manera estrecha. La primera estructura amorfa se obtuvo a finales de la década de 1960 mediante la **solidificación rápida** de una aleación fundida (sección 11.6). Debido a que su estructura se asemeja a la de los vidrios, a estas aleaciones también se les llama **vidrios metálicos**.

Las aleaciones amorfas normalmente contienen hierro, níquel y cromo aleados con carbono, fósforo, boro, aluminio y silicio, además están disponibles como alambres, cintas, tiras y polvo. Una de sus aplicaciones tiene lugar en los insertos de la cara frontal de la cabeza de los palos de golf; la aleación tiene una composición de circonio, berilio, cobre, titanio y níquel y se fabrica mediante fundición a presión. Otra aplicación se encuentra en los bates de béisbol huecos hechos de aluminio y recubiertos con un compuesto de metal amorfo por pulverización térmica, el cual se dice mejora el rendimiento del bate.

Las aleaciones amorfas presentan una excelente resistencia a la corrosión, buena ductilidad, alta resistencia y muy baja histéresis magnética (utilizada en los núcleos magnéticos de acero para transformadores, generadores, motores, balastos de lámparas, amplificadores magnéticos y aceleradores lineales). La baja histéresis magnética ofrece una gran mejora en la eficiencia; sin embargo, los costos de fabricación son significativos. Se ha demostrado que los aceros amorfos poseen resistencias dos veces más grandes que las de los aceros de alta resistencia y tienen aplicaciones potenciales en grandes estructuras; pero sus costos actuales los hacen poco accesibles. Una de las principales aplicaciones de las superaleaciones de polvos solidificados rápidamente es la consolidación en formas casi netas de las piezas utilizadas en motores aeroespaciales.

6.15 Espumas metálicas

Las *espumas metálicas* son estructuras en las que el metal compone sólo entre el 5 y el 20% del volumen de la estructura, como se muestra en la figura 6.3. Por lo general, las espumas de metal están hechas de aleaciones de aluminio (aunque también de titanio, tantalio y otros) y pueden producirse al inyectar aire en el metal fundido y recoger la efervescencia que se forma en la superficie; esta efervescencia se solidifica en una espuma. Otros enfoques para la producción de **espuma metálica** incluyen: (a) deposición química de vapor (sección 34.6.2) en una red de espuma de carbono, (b) depósito de polvos metálicos a partir de una suspensión sobre una red de espuma de polímero, seguido de sinterización (sección 17.4) para fundir el metal y quemar el polímero, (c) dopaje de metales fundidos o en polvo con hidruro de titanio (TiH_2), que luego libera hidrógeno a temperaturas elevadas de fundición o sinterización, y (d) vertido de metal fundido en una sal porosa y, al enfriar, lixiviación de la sal con ácido.

Las espumas metálicas tienen combinaciones únicas en sus relaciones de resistencia a densidad y rigidez a densidad, aunque estas relaciones no son tan altas como las de los propios metales base. Sin embargo, las espumas de metal son muy ligeras y, por lo tanto, son materiales atractivos, especialmente para aplicaciones aeroespaciales. Debido a su porosidad, entre otras aplicaciones de las espumas metálicas están los filtros y los implantes ortopédicos. Los desarrollos más recientes incluyen espumas metálicas de níquel-manganeso-galio con características de memoria de forma.

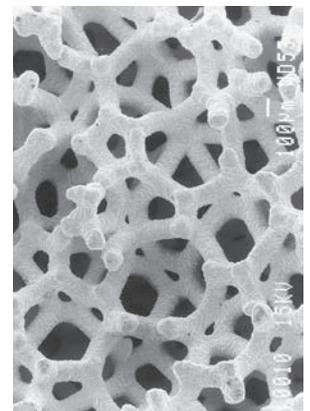


FIGURA 6.3 Estructura de una espuma metálica que se usa en implantes ortopédicos para fomentar el crecimiento del hueso. Fuente: Cortesía de Zimmer, Inc.

RESUMEN

- Los metales no ferrosos y sus aleaciones incluyen un rango muy amplio de materiales. Los más comunes son aluminio, magnesio y cobre y sus aleaciones, con una amplia gama de aplicaciones. Los metales no ferrosos para servicio a altas temperaturas incluyen al níquel, titanio, aleaciones refractarias (molibdeno, niobio, tungsteno, tantalio) y superaleaciones. Otras categorías de metales no ferrosos incluyen aleaciones de bajo punto de fusión (plomo, zinc, estaño) y metales preciosos (oro, plata, platino).
- Las aleaciones no ferrosas tienen una amplia variedad de propiedades deseables, como resistencia mecánica, tenacidad, dureza y ductilidad, resistencia a altas temperaturas, a la termofluencia y a la oxidación; un amplio rango de propiedades físicas, térmicas y químicas y altas relaciones de resistencia a peso y rigidez a peso (especialmente para el aluminio y el titanio). Las aleaciones no ferrosas pueden tratarse térmicamente para impartirles ciertas propiedades específicas.
- Las aleaciones con memoria de forma (materiales inteligentes) tienen propiedades únicas con numerosas aplicaciones en toda una variedad de productos, así como en operaciones de manufactura.
- Las aleaciones amorfas (vidrios metálicos) poseen propiedades superiores a las de otros materiales; están disponibles en diversas formas y tienen numerosas aplicaciones.
- Las espumas metálicas son muy ligeras y, por consiguiente, resultan atractivas para el sector aeroespacial y otras diversas aplicaciones.
- De igual modo que ocurre con todos los materiales, la selección de un material no ferroso para una aplicación particular requiere de una cuidadosa consideración de varios factores, incluyendo los requisitos de diseño y servicio, los efectos a largo plazo, la afinidad química con otros materiales, el ataque del medio ambiente y el costo.

TÉRMINOS CLAVE

Aleaciones amorfas	Babbitts	Latón	Peltre
Aleaciones con memoria de forma	Bronce	Materiales inteligentes	Pirometalurgia
Aleaciones de bajo punto de fusión	Espuma metálica	Metales preciosos	Superaleaciones
	Fundiciones (<i>smelted</i>)	Metales refractarios	Vidrios metálicos
	Galvanizado	No ferrosos	

BIBLIOGRAFÍA

- ASM Handbook, Vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, 1990.
- ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 1993.
- ASM Specialty Handbook, Copper and Copper Alloys, ASM International, 2001.
- ASM Specialty Handbook, Heat-Resistant Materials, ASM International, 1997.
- ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, ASM International, 1999.
- ASM Specialty Handbook, Nickel, Cobalt, and Their Alloys, ASM International, 2000.
- Donachie, M. J. (ed.), Titanium: A Technical Guide, 2a. ed., ASM International, 2000.
- Donachie, M. J. y Donachie, S. J., Superalloys: A Technical Guide, 2a. ed., ASM International, 2002.
- Fremont, M. y Miyazaki, S., Shape-Memory Alloys, Springer Verlag, 1996.
- Geddes, B., H. Leon y Huang, X., Superalloys: Alloying and Performance, ASM International, 2010.

- Kaufman, J. G., *Introduction to Aluminum Alloys and Temperers*, ASM International, 2000.
- Lagoudas, D. C. (ed.), *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*, Springer, 2008.
- Leo, D. J., *Engineering Analysis of Smart Material Systems*, Wiley, 2007.

- Lutjering, G. y Williams, J. C., *Titanium*, 2a. ed., Springer, 2007.
- Russel, A. y Lee, K. L., *Structure-Property Relations in Nonferrous Metals*, Wiley-Interscience, 2005.
- Schwartz, M., *Smart Materials*, CRC Press, 2008.

PREGUNTAS DE REPASO

- 6.1** Dada la abundancia de aluminio en la corteza terrestre, explique por qué es más caro que el acero.
- 6.2** ¿Por qué el magnesio se utiliza con frecuencia como material estructural en las herramientas eléctricas manuales? ¿Por qué se utilizan sus aleaciones en vez de magnesio puro?
- 6.3** ¿Cuáles son los principales usos del cobre? ¿Cuáles son los elementos de aleación del latón y el bronce, respectivamente?
- 6.4** ¿Qué son las superaleaciones? ¿Por qué se llaman así?
- 6.5** ¿Qué propiedades del titanio lo hacen atractivo para su uso en componentes de automóviles de carreras y motores a reacción? ¿Por qué el titanio no se utiliza ampliamente para componentes del motor en los vehículos de pasajeros?
- 6.6** ¿Qué propiedades de cada uno de los principales metales refractarios definen sus aplicaciones más útiles?
- 6.7** ¿Qué son los vidrios metálicos? ¿Por qué se utiliza la palabra “vidrio” para designar estos materiales?
- 6.8** ¿Cuál es la composición de (a) el babbitt, (b) el estaño y (c) la plata Sterling?
- 6.9** Mencione los materiales descritos en este capítulo que tienen la más alta (a) densidad, (b) conductividad eléctrica, (c) conductividad térmica, (d) resistencia y (e) el mayor costo.
- 6.10** ¿Cuáles son los principales usos del oro y la plata, aparte de la joyería?
- 6.11** Describa las ventajas de usar zinc como recubrimiento para el acero.
- 6.12** ¿Qué son los nanomateriales? ¿Por qué se están desarrollando?
- 6.13** ¿Por qué los fuselajes de los aviones están hechos de aleaciones de aluminio a pesar de que el magnesio es el metal más liviano?
- 6.14** ¿Cómo se produce la espuma metálica?
- 6.15** ¿Qué metales tienen los puntos de fusión más bajos? ¿Qué aplicaciones de estos metales aprovechan sus puntos de fusión bajos?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 6.16** Explique por qué los utensilios de cocina suelen estar hechos de acero inoxidable, aluminio o cobre.
- 6.17** ¿Sería ventajoso representar los datos de la tabla 6.1 en términos de costo por unidad de peso en vez de costo por unidad de volumen? Explique su respuesta y proporcione algunos ejemplos.
- 6.18** Compare el contenido de la tabla 6.3 con el de otras diversas tablas y datos sobre materiales que se presentan en este libro; después, comente sobre cuál de los dos procesos de endurecimiento (tratamiento térmico y endurecimiento por trabajo) es más eficaz en la mejora de la resistencia de las aleaciones de aluminio.
- 6.19** ¿Qué factores distintos a la resistencia mecánica deben considerarse durante la selección de metales y aleaciones para aplicaciones a altas temperaturas? Explique.
- 6.20** Suponga que, por razones geopolíticas, el precio del cobre se incrementa rápidamente. Mencione dos metales con propiedades mecánicas y físicas similares que puedan sustituir al cobre. Comente sobre su selección y cualquier observación que realice.
- 6.21** Si los aviones, como el Boeing 757, están hechos de aluminio en 79%, ¿por qué los automóviles están hechos principalmente de acero?
- 6.22** Las computadoras portátiles (notebooks) y las cámaras digitales pueden tener una carcasa de magnesio. ¿Por qué?
- 6.23** La mayor parte del cableado doméstico está hecho de alambre de cobre. En cambio, el cable de tierra que conecta las antenas parabólicas y otros cables similares son de aluminio. Explique la razón de esto.
- 6.24** El ejemplo de este capítulo muestra los beneficios de la fabricación de automóviles a partir de aleaciones de aluminio. Sin embargo, la cantidad media de acero en los coches ha aumentado en la última década. Liste las razones que explican estas dos observaciones.
- 6.25** Si el tungsteno es el metal con el punto de fusión más alto, ¿por qué en la figura 6.1 hay piezas hechas de tungsteno que no se usan a altas temperaturas?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

- 6.26** Una viga rectangular simplemente apoyada tiene 25 mm de ancho y 1 m de largo y está sometida a una carga vertical de 10 kg en su centro. Suponga que esta viga puede estar hecha de cualquiera de los materiales listados en la tabla 6.1. Seleccione tres materiales diferentes y, para cada uno, calcule la altura de la viga que haría que ésta tuviera la misma deflexión máxima. Calcule la relación del costo para cada una de las tres vigas.

6.27 Consiga algunas latas de aluminio para bebidas, córtelas y mida sus espesores de pared. Utilizando los datos de este capítulo y las fórmulas simples para contenedores cerrados, a presión y de pared delgada, calcule la presión interna máxima que pueden soportar estas latas antes de que cedan. (Suponga que la lata es un contenedor cerrado, de pared delgada, presurizado internamente).

6.28 Por lo general, las latas para bebidas se apilan una sobre otra en las tiendas. Utilice la información del problema 6.24 y, en referencia a los libros de texto sobre mecánica de sólidos, estime la carga a compresión que puede soportar cada una de estas latas.

6.29 Usando datos de resistencia y densidad, determine el peso mínimo de un miembro a tensión con 1 m de longitud que debe soportar 3000 N si está hecho de (a) aluminio 3003-O, (b) aluminio 5052-H34, (c) magnesio AZ31B-F, (d) cualquier aleación de latón y (e) cualquier aleación de bronce.

6.30 Grafique lo siguiente para los materiales descritos en este capítulo: (a) resistencia a la cedencia contra densidad, (b) módulo de elasticidad contra resistencia, (c) módulo de elasticidad contra costo relativo y (d) conductividad eléctrica contra densidad.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

6.31 Debido a la cantidad de procesos que intervienen en la fabricación de metales, el costo de las materias primas depende de la condición (en caliente o en frío), la forma (placa, lámina, barra, tubo) y el tamaño de los metales. Realice un sondeo de la literatura técnica y obtenga una lista de precios, o póngase en contacto con proveedores y prepare una lista, que indique el costo por cada 100 kg de los materiales no ferrosos descritos en este capítulo y estén disponibles en diferentes condiciones, formas y tamaños.

6.32 Los materiales descritos en este capítulo tienen numerosas aplicaciones. Revise la literatura disponible en la bibliografía y prepare una lista de varias piezas o componentes y aplicaciones específicas que indique el tipo de materiales utilizados.

6.33 Mencione los productos que no se hubieran desarrollado hasta sus etapas avanzadas (como los encontramos hoy en día) de no haberse desarrollado aleaciones que tienen alta resistencia mecánica, alta resistencia a la corrosión y alta resistencia a la termofluencia (todo a temperaturas elevadas).

6.34 Suponga que usted es el gerente técnico de ventas de una empresa productora de metales no ferrosos. Elija uno de los

metales o una de las aleaciones descritas en este capítulo y prepare un folleto, que incluya algunas ilustraciones, para ser usado como documentación de ventas por su personal al tener contacto con los clientes potenciales.

6.35 Mencione algunas aplicaciones de (a) los metales amorfos, (b) los metales preciosos, (c) las aleaciones de bajo punto de fusión y (d) los nanomateriales.

6.36 Describa las ventajas de la fabricación de productos con materiales multicapas. (Por ejemplo, aluminio unido a la parte inferior de las ollas de acero inoxidable).

6.37 En el texto, el magnesio se describió como el metal ingenieril más ligero. ¿También es el metal más ligero? Explique.

6.38 Revise la literatura técnica e internet y resuma los metales de tierras raras, sus fuentes y principales aplicaciones.

6.39 Revise la literatura técnica y escriba una descripción detallada sobre cómo se produce el magnesio a partir del agua de mar.

6.40 Si usted tuviera que diseñar un implante para uso en el cuerpo humano, ¿qué materiales excluiría? ¿Qué metales pueden usarse en este tipo de aplicaciones? De éstos, liste los tres que usted considera son los mejores.

Polímeros: estructura, propiedades generales y aplicaciones

CAPÍTULO

7

- Los polímeros presentan un amplio rango de propiedades y tienen varias ventajas sobre los materiales metálicos, incluyendo bajo costo y facilidad de fabricación; por estas razones, los polímeros siguen siendo uno de los materiales más utilizados.
- En este capítulo se describen primero la estructura de los polímeros, el proceso de polimerización, la cristalinidad y la temperatura de transición vítrea.
- Después se analizan las propiedades mecánicas y su dependencia de la temperatura y la velocidad de deformación.
- Existen dos tipos básicos de polímeros: los termoplásticos y los termofijos. Con los termoplásticos se sigue una estrategia de manufactura básica consistente en calentarlos hasta que se ablandan o derriten, para después darles la forma del producto deseado. Los termofijos implican precursores que reciben una forma deseada y se fijan a través de polimerización o entrelazamiento de las cadenas del polímero.
- En este capítulo también se describen las propiedades y usos de los elastómeros o hules.
- A lo largo del capítulo se analizan las propiedades generales, aplicaciones típicas, ventajas y limitaciones de los polímeros empleando varios ejemplos específicos.

7.1	Introducción	169
7.2	Estructura de los polímeros	171
7.3	Termoplásticos	178
7.4	Plásticos termofijos	181
7.5	Aditivos en los plásticos	182
7.6	Propiedades generales y aplicaciones de los termoplásticos	183
7.7	Propiedades generales y aplicaciones de los plásticos termofijos	186
7.8	Plásticos biodegradables	187
7.9	Elastómeros (hules)	188

CASOS DE ESTUDIO:

7.1	Cemento óseo dental y médico	175
7.2	Uso de los polímeros eléctricamente conductores en baterías recargables	181
7.3	Materiales para forro de puertas de refrigerador	187

7.1 Introducción

La palabra **plástico** se utilizó por primera vez como sustantivo en 1909 y se emplea habitualmente como sinónimo de **polímero**, un término utilizado por primera vez en 1866. Los plásticos son únicos porque tienen moléculas extremadamente grandes (*macromoléculas* o *moléculas gigantes*). Los productos de consumo e industriales hechos de plástico incluyen envases de alimentos y bebidas, empaques, señalamientos, enseres domésticos, carcasas para computadoras y monitores, textiles (ropa), dispositivos médicos, espumas, pinturas, escudos de seguridad, juguetes, electrodomésticos, lentes, engranajes, productos eléctricos y electrónicos, carrocerías de automóvil y componentes de aviones.

Debido a sus muchas y muy particulares propiedades, los polímeros reemplazan cada vez con mayor frecuencia a componentes metálicos en aplicaciones tales como automóviles, aviones civiles y militares, artículos deportivos, juguetes, electrodomésticos y equipos de oficina. Estas sustituciones reflejan las ventajas de los polímeros en cuanto a las siguientes características:

- Relativamente bajo costo (vea la tabla 6.1).
- Resistencia a la corrosión y resistencia a los productos químicos.
- Baja conductividad eléctrica y térmica.
- Baja densidad.
- Alta relación resistencia a peso, sobre todo cuando están reforzados.

- Reducción del ruido.
- Amplio rango de colores y transparencias.
- Posibilidades de diseños complejos y facilidad de manufactura.
- Otras características que pueden ser deseables o no (dependiendo de la aplicación) son su baja resistencia y rigidez (tabla 7.1), alto coeficiente de dilatación térmica, bajo rango de temperatura útil —hasta aproximadamente 350 °C (660 °F)— y poca estabilidad dimensional en el servicio durante cierto periodo.

La palabra *plástico* proviene del griego *plastikos*, que significa “capaz de ser moldeado y formado”. Los plásticos pueden formarse, fundirse, maquinarse y unirse en diversas formas con relativa facilidad. Las operaciones de acabado superficial adicionales requeridas son mínimas o inexistentes; esta característica proporciona una importante ventaja frente a los metales. Los plásticos están comercialmente disponibles como películas, láminas, hojas, barras y tubos con diferentes secciones transversales.

TABLA 7.1
Rango de propiedades mecánicas para varios plásticos de ingeniería a temperatura ambiente

Material	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación (%)	Relación de Poisson, ν
Termoplásticos:				
Acilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)	28-55	1.4-2.8	75-5	—
ABS, reforzado	100	7.5	—	0.35
Acetal	55-70	1.4-3.5	72-25	—
Acetal, reforzado	135	10	—	0.35-0.40
Acrílico	40-75	1.4-3.5	50-5	—
Celulósico	10-48	0.4-1.4	100-5	—
Fluorocarbono	7-48	0.7-2	300-100	0.46-0.48
Nailon	55-83	1.4-2.8	200-60	0.32-0.40
Nailon, reforzado	70-210	2-10	10-1	—
Policarbonato	55-70	2.5-3	125-10	0.38
Policarbonato, reforzado	110	6	6-4	—
Poliéster	55	2	300-5	0.38
Poliéster, reforzado	110-160	8.3-12	3-1	—
Polietileno	7-40	0.1-1.4	1000-15	0.46
Polipropileno	20-35	0.7-1.2	500-10	—
Polipropileno, reforzado	40-100	3.5-6	4-2	—
Poliestireno	14-83	1.4-4	60-1	0.35
Cloruro de polivinilo	7-55	0.014-4	450-40	—
Termofijos:				
Epóxico	35-140	3.5-17	10-1	—
Epóxico, reforzado	70-1400	21-52	4-2	—
Fenólico	28-70	2.8-21	2-0	—
Poliéster, insaturado	30	5-9	1-0	—
Elastómeros:				
Cloropreno (neopreno)	15-25	1-2	100-500	0.5
Caucho natural	17-25	1.3	75-650	0.5
Silicona	5-8	1-5	100-1100	0.5
Estireno-butadieno	10-25	2-10	250-700	0.5
Uretano	20-30	2-10	300-450	0.5

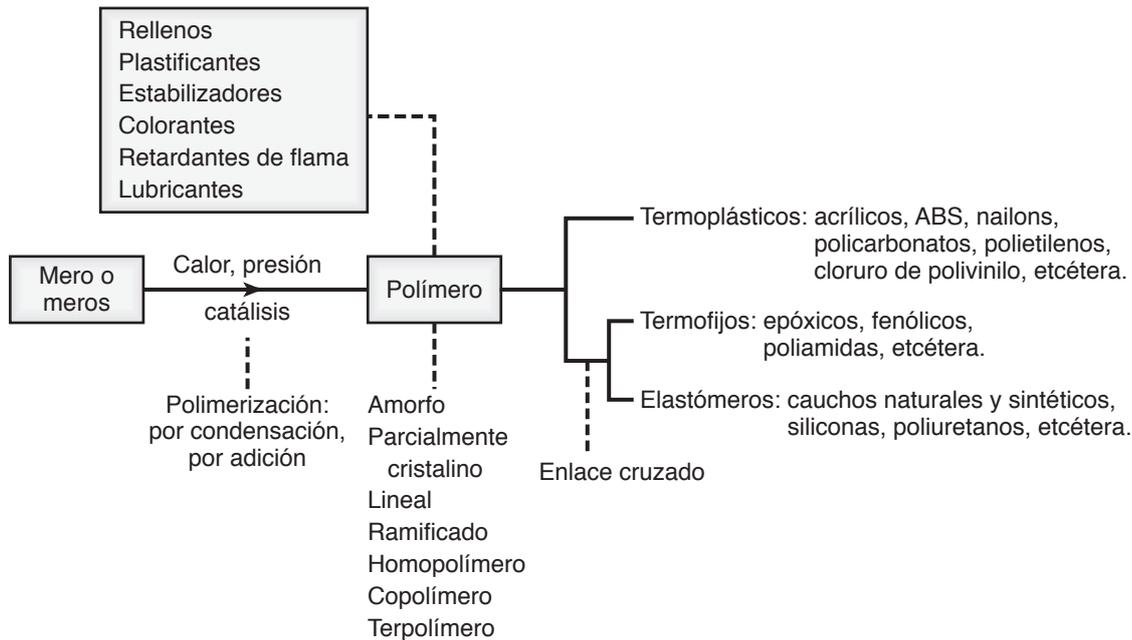


FIGURA 7.1 Esquema de los temas descritos en este capítulo.

En la figura 7.1 se presenta un esquema del proceso básico seguido para la fabricación de polímeros sintéticos. En el polietileno, sólo están involucrados átomos de carbono e hidrógeno, pero es posible obtener otros compuestos poliméricos mediante la inclusión de cloro, flúor, azufre, silicio, nitrógeno y oxígeno. Como resultado, se ha desarrollado una gama extremadamente amplia de polímeros que guardan entre sí un rango igualmente amplio de propiedades.

7.2 Estructura de los polímeros

Las propiedades de los polímeros dependen en gran medida de las estructuras de las moléculas individuales del polímero, de la forma y el tamaño de la molécula y de la disposición de las moléculas para formar una estructura polimérica. Las moléculas de polímero se caracterizan por su gran tamaño, una cualidad que las distingue de la mayoría de las composiciones químicas orgánicas. Los polímeros son **moléculas de cadena larga** que se forman por *polimerización*; es decir, mediante el enlace y el enlace cruzado de diferentes monómeros. Un **monómero** es el bloque básico de construcción de un polímero. La palabra mero (del griego *meros*, que significa “parte”) indica la unidad repetitiva más pequeña, por lo tanto, el término es similar al de *célula unitaria* que se utiliza en las estructuras cristalinas de los metales (sección 1.3).

La palabra **polímero** significa “muchos meros”, generalmente repetidos cientos o miles de veces en una estructura tipo cadena. La mayoría de los monómeros son *materiales orgánicos*, en los que los átomos de carbono se unen en enlaces *covalentes* (compartiendo electrones) con otros átomos (como hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, flúor, cloro, silicio y azufre). Una molécula de etileno (figura 7.2) es ejemplo de un monómero simple, el cual consiste en átomos de carbono e hidrógeno.

7.2.1 Polimerización

Los monómeros pueden estar enlazados en unidades repetitivas para formar moléculas más largas y más grandes mediante un proceso químico llamado **reacción de polimerización**.

Monómero	Unidad de repetición del polímero
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{C}=\text{C} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	$\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right)_n$ <p>Poliétileno (PE, o también con el acrónimo PETE)</p>
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{C}=\text{C} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$	$\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$ <p>Polipropileno (PP)</p>
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{C}=\text{C} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array}$	$\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array} \right)_n$ <p>Cloruro de polivinilo (PVC)</p>
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{C}=\text{C} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	$\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_n$ <p>Poliestireno (PS)</p>
$\begin{array}{c} \text{Fl} \quad \text{Fl} \\ \quad \\ \text{C}=\text{C} \\ \quad \\ \text{Fl} \quad \text{Fl} \end{array}$	$\left(\begin{array}{c} \text{Fl} \quad \text{Fl} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{Fl} \quad \text{Fl} \end{array} \right)_n$ <p>Politetrafluoroetileno (PTFE) (Teflón)</p>

FIGURA 7.2 Estructura molecular de varios polímeros; estos son ejemplos de los bloques de construcción básicos utilizados para los plásticos.

Aunque hay algunas variaciones, los procesos de polimerización importantes son dos: por condensación y por adición.

En la **polimerización por condensación** (figura 7.3a), los polímeros se producen mediante la formación de enlaces entre dos tipos de meros reaccionantes. Una característica de esta reacción es que los subproductos de reacción (como el agua) se condensan (de ahí la palabra *condensación*). Este proceso también se conoce como **polimerización por crecimiento en etapas** o **por reacción en etapas** debido a que la molécula de polímero crece paso a paso hasta que se consume todo el reactivo.

En la **polimerización por adición**, también llamada **polimerización por crecimiento de cadena** o por reacción en cadena, el enlazamiento se lleva a cabo sin subproductos de reacción, como se muestra en la figura 7.3b. Se le llama *reacción en cadena* debido a la alta velocidad a la que se forman simultáneamente moléculas largas, por lo general en el lapso de unos pocos segundos. Esta velocidad es mucho más alta que en la polimerización por condensación. En la polimerización por adición se añade un *catalizador* para abrir el doble enlace entre dos átomos de carbono, el cual comienza entonces el proceso de enlace mediante la adición de varios monómeros más a una cadena en crecimiento. Por ejemplo, los monómeros de etileno (figura 7.3b) se enlazan para producir *poliétileno*; en la figura 7.2 se presentan otros ejemplos de polímeros formados por adición.

Peso molecular. La suma de los pesos moleculares de los meros presentes en una cadena representativa se conoce como el *peso molecular* del polímero; cuanto mayor sea el peso molecular de un polímero dado, mayor será la longitud promedio de la cadena representativa. La mayoría de los polímeros comerciales tienen un peso molecular de entre 10 000 y 10 millones. Debido a que la polimerización es un evento aleatorio, las cadenas de polímero producidas no son todas de igual longitud; sin embargo, las longitudes de cadena produci-

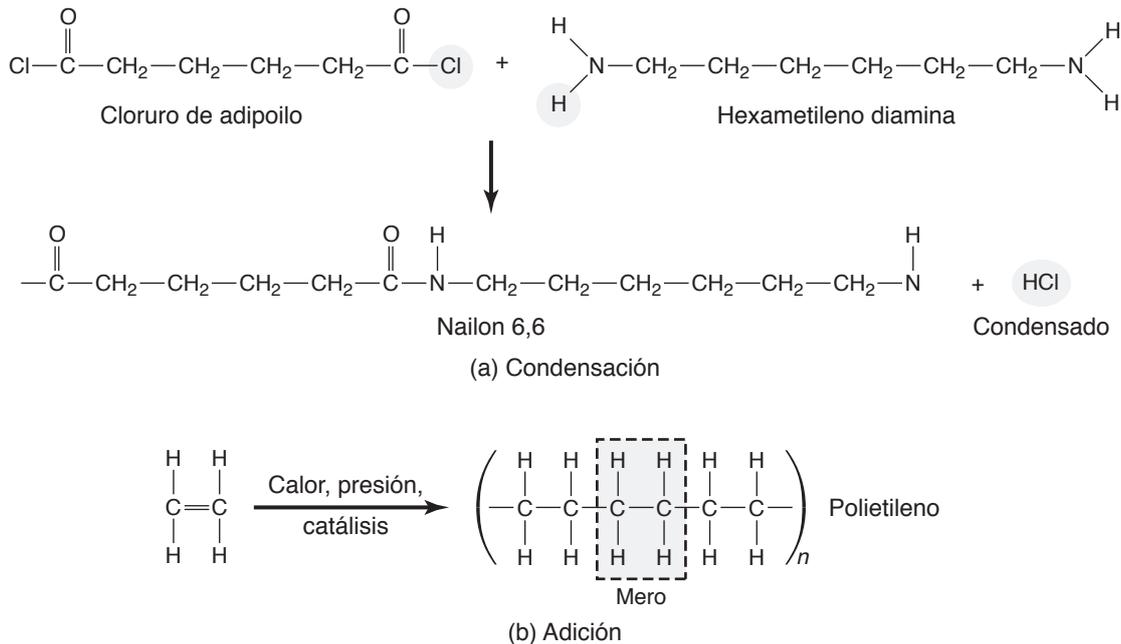


FIGURA 7.3 Ejemplos de polimerización. (a) Polimerización por condensación de nailon 6,6 y (b) polimerización por adición de moléculas de polietileno a partir de meros de etileno.

das caen en una curva de distribución tradicional (como se describe en la sección 36.7). El peso molecular de un polímero se determina en forma estadística con base en promedios.

La dispersión de los pesos moleculares que hay en una cadena se llama **distribución del peso molecular**. El peso molecular de un polímero y su distribución tienen una gran influencia en sus propiedades. Por ejemplo, con el incremento del peso molecular, aumenta la resistencia del polímero a la tensión, al impacto, al agrietamiento y a la viscosidad (en estado fundido) o molecular (figura 7.4).

Grado de polimerización. Es conveniente expresar el tamaño de una cadena polimérica en términos del *grado de polimerización* (DP, por sus siglas en inglés), el cual se define como la relación del peso molecular del polímero al peso molecular de la unidad de repetición. Por ejemplo, el cloruro de polivinilo (PVC) tiene un peso de mero de 62.5; es decir, el grado de polimerización del PVC con un peso molecular de 50 000 es $50\,000/62.5 = 800$. En términos del procesamiento de polímeros (que se describe en el capítulo 19), cuanto mayor sea el DP mayor será la viscosidad del polímero o su resistencia a la fluencia (figura 7.4). Por otra parte, una alta viscosidad afecta negativamente la facilidad de formado y, por lo tanto, aumenta el costo global de procesamiento; asimismo, un alto DP puede dar lugar a polímeros más fuertes.

Enlaces. Durante la polimerización, los monómeros están unidos entre sí mediante enlaces covalentes (sección 1.2) que forman una cadena polimérica. Debido a su fuerza, los enlaces covalentes también se denominan **enlaces primarios**. Las cadenas poliméricas, a su vez, se mantienen unidas por medio de **enlaces secundarios**, tales como los enlaces de Van der Waals, enlaces de hidrógeno y enlaces iónicos. Los enlaces secundarios son más débiles que los enlaces primarios por uno a dos órdenes de magnitud.

En un polímero dado, el aumento de la resistencia y la viscosidad con el peso molecular se debe, en parte, al hecho de que cuanto más larga sea la cadena po-

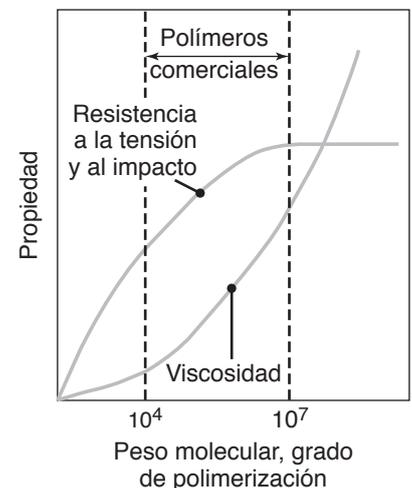


FIGURA 7.4 Efecto del peso molecular y del grado de polimerización sobre la resistencia y la viscosidad de los polímeros.

limérica mayor será la energía necesaria para superar la fuerza combinada de los enlaces secundarios. Por ejemplo, los polímeros de etileno que tienen grados de polimerización de 1, 6, 35, 140 y 1350 a temperatura ambiente están, respectivamente, en forma de gas, líquido, grasa, cera y plástico duro.

Polímeros lineales. Los polímeros del tipo cadena que se muestran en la figura 7.2 se llaman *polímeros lineales* debido a su estructura secuencial (figura 7.5a); sin embargo, una molécula lineal no necesariamente tiene forma recta. Además de los polímeros lineales que se muestran en la figura, existen otros como las poliamidas (nylon 6,6) y el fluoruro de polivinilo. En general, un polímero se compone de más de un tipo de estructura, por lo que un polímero lineal puede contener algunas cadenas ramificadas y otras con enlaces cruzados. Como resultado de la ramificación y los enlaces cruzados, las propiedades del polímero cambian significativamente.

Polímeros ramificados. Las propiedades de un polímero dependen no sólo del tipo de monómeros, sino también de su disposición en la estructura molecular. En los *polímeros ramificados* (figura 7.5b), las cadenas de las ramas laterales se unen a la cadena principal durante la síntesis del polímero. La ramificación interfiere con el movimiento relativo de las cadenas moleculares y, en consecuencia, su resistencia a la deformación y al agrietamiento por esfuerzo se incrementa. La densidad de los polímeros ramificados es más baja que la de los polímeros de cadena lineal, ya que las ramas interfieren con la eficiencia de la compactación de las cadenas poliméricas.

El comportamiento de los polímeros ramificados puede compararse con el de los polímeros de cadena lineal mediante una analogía con una pila de ramas de árbol (*polímeros ramificados*) y un montón de troncos rectos (*polímeros lineales*). Tenga en cuenta que es más difícil mover una rama que está dentro de la pila de ramas que mover un tronco dentro de su montón. Los enmarañamientos tridimensionales de las ramas hacen que sus movimientos sean más difíciles, este fenómeno es parecido al aumento de la resistencia del polímero.

Polímeros con enlaces cruzados. En general, los *polímeros con enlaces cruzados*, que tienen una estructura tridimensional, poseen cadenas adyacentes unidas mediante enlaces

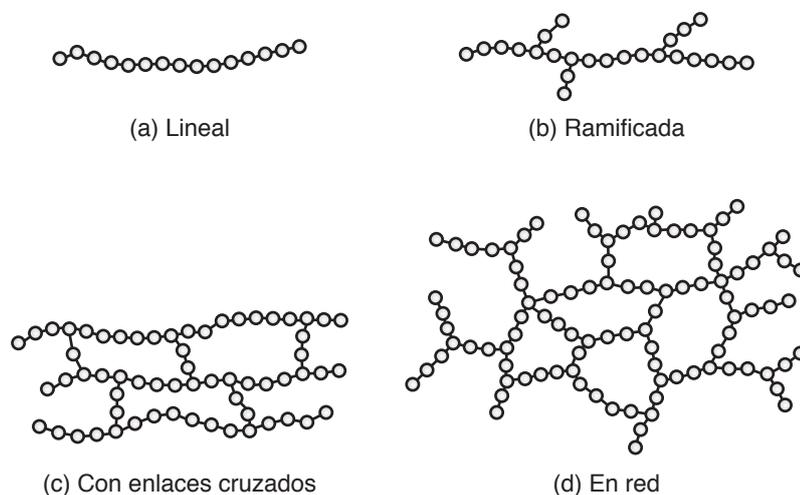


FIGURA 7.5 Ilustración esquemática de las cadenas poliméricas. (a) Estructura lineal —los termoplásticos como los acrílicos, el nylon, el polietileno y el cloruro de polivinilo tienen estructuras lineales. (b) Estructura ramificada, como en el polietileno. (c) Estructura con enlaces cruzados —muchos cauchos, o elastómeros, tienen esta estructura que también puede ser producida por la vulcanización del caucho. (d) Estructura en red, la cual tiene básicamente enlaces altamente cruzados —un ejemplo son los plásticos termofijos, como los epóxicos y fenólicos.

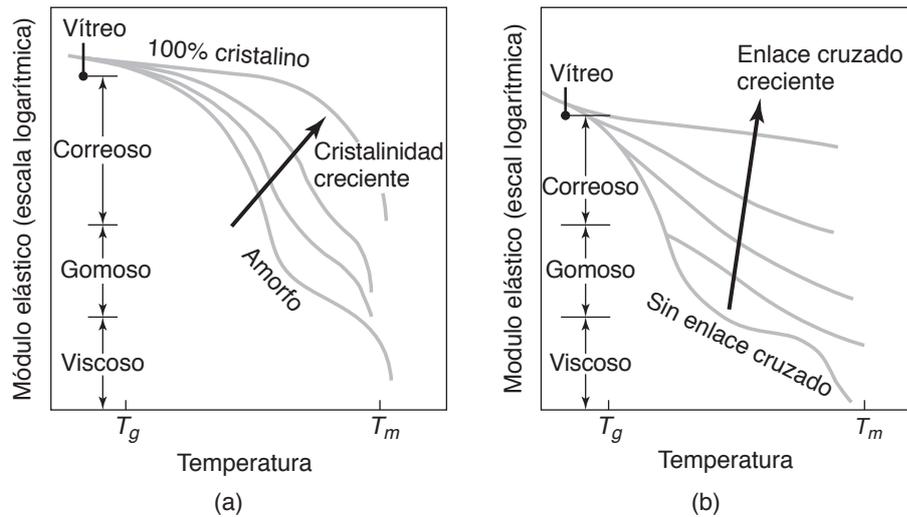


FIGURA 7.6 Comportamiento de los polímeros como una función de la temperatura y (a) el grado de cristalinidad y (b) el grado de enlaces cruzados. El comportamiento elástico y viscoso combinado de los polímeros se conoce como viscoelasticidad.

covalentes (figura 7.5c). Los polímeros con una estructura de enlaces cruzados se denominan **plásticos termofijos** o **termofijos**, tales como los epóxicos, los fenólicos y las siliconas. Los enlaces cruzados tienen una influencia importante sobre las propiedades de los polímeros a los cuales, por lo general, les imparten dureza, resistencia, rigidez, fragilidad y mejor estabilidad dimensional (vea la figura 7.6), y sobre la **vulcanización** del caucho (sección 7.9).

Polímeros en red. Estos polímeros se componen de redes espaciales (tridimensionales) que consisten en tres o más enlaces covalentes activos (figura 7.5d). Un polímero altamente entrelazado también se considera un *polímero en red*. Los polímeros termoplásticos que ya han sido formados pueden ser de enlaces cruzados para obtener mayor resistencia al someterlos a radiación de alta energía, como luz ultravioleta, rayos X o haces de electrones. Sin embargo, la radiación excesiva puede causar degradación del polímero.

Copolímeros y terpolímeros. Si todas las unidades repetitivas presentes en una cadena polimérica son del mismo tipo, se dice que la molécula es un *homopolímero*. Sin embargo, como sucede con las aleaciones de metales en solución sólida (sección 4.2), es posible combinar dos o tres tipos diferentes de monómeros para desarrollar ciertas propiedades y características, como mejorar la resistencia, la tenacidad y la formabilidad del polímero. (a) Los *copolímeros* contienen dos tipos de polímeros; por ejemplo, estireno y butadieno, ampliamente utilizados en los neumáticos de automóvil. (b) Los *terpolímeros* contienen tres tipos de polímeros, por ejemplo, acrilonitrilo, butadieno y estireno (ABS), que se utilizan en cascos, teléfonos y forros de refrigerador.

CASO DE ESTUDIO 7.1 Cemento óseo dental y médico

El polimetilmetacrilato (PMMA) es un polímero acrílico usado comúnmente en aplicaciones dentales y médicas como adhesivo, el cual se refiere a menudo como cemento óseo. Hay varias formas de PMMA, pero el

adhesivo es una forma común que implica una reacción de polimerización por adición. El PMMA se suministra en dos partes: un polvo y un líquido que se mezclan a mano. El líquido humedece y disuelve parcialmente el

(continúa)

polvo, lo que resulta en un líquido con una viscosidad similar a la del aceite vegetal. La viscosidad aumenta notablemente hasta que alcanza un estado pastoso en alrededor de cinco minutos. La masa se endurece completamente en cinco minutos más.

El polvo se compone de polipartículas [(metacrilato de metilo)-costireno] con alto peso molecular —y unos 50 μm de diámetro— y contiene una pequeña fracción por volumen de peróxido de benzoilo. El líquido se compone de monómero metacrilato de metilo (MMA) con una pequeña cantidad de *n, n* dimetil p-toluidino (DMPT) disuelto. Cuando el líquido y el polvo se mezclan, el DMPT divide la molécula de peróxido de benzoilo en dos partes para formar un catalizador con un electrón libre (referido en ocasiones como radical libre). Este catalizador causa un rápido crecimiento del polimetilmetacrilato a partir de los meros de MMA, de modo que el material final es un compuesto de partículas de PMMA con alto peso molecular interconectadas mediante cadenas de PMMA. En la figura 7.7 se muestra una ilustración de un cemento óseo completamente formado.

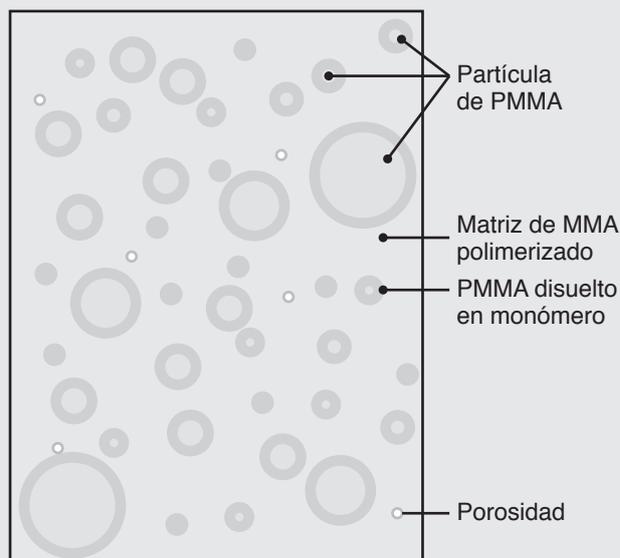


FIGURA 7.7 Ilustración esquemática de la microestructura del cemento de polimetilmetacrilato utilizado en aplicaciones dentales y médicas.

7.2.2 Cristalinidad

Por lo general, polímeros como el PMMA, el policarbonato y el poliestireno son **amorfos**; es decir, las cadenas de polímero existen sin un orden de largo alcance (vea también *aleaciones amorfas*, sección 6.14). Con frecuencia, la disposición amorfa de las cadenas de polímero se describe como si fuera un plato de espagueti, o como gusanos en una cubeta, con todas las cadenas entrelazadas unas con otras. Sin embargo, en algunos polímeros es posible impartir alguna cristalinidad y, por lo tanto, modificar sus características. Esta disposición puede fomentarse durante la síntesis del polímero o bien mediante deformación durante su procesamiento subsecuente.

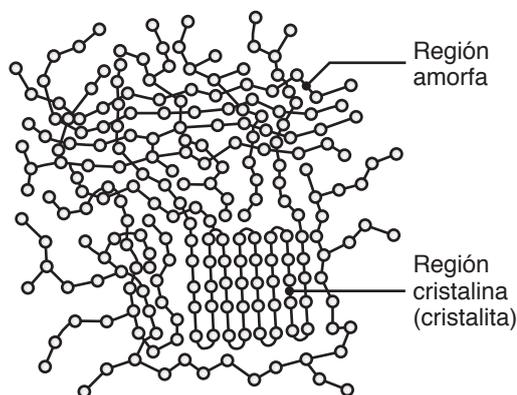


FIGURA 7.8 Regiones amorfa y cristalina en un polímero; la región cristalina (cristalita) tiene una disposición ordenada de las moléculas. Cuanto mayor sea la cristalinidad, más duro, más rígido y menos dúctil será el polímero.

Las regiones cristalinas presentes en los polímeros se llaman **cristalitas** (figura 7.8). Se forman cuando moléculas largas se disponen de manera ordenada, similar al doblado de una manguera de incendios en un gabinete o de pañuelos faciales en una caja. Un polímero parcialmente cristalino (**semicristalino**) puede ser visto como un material de dos fases, con una fase cristalina y otra amorfa.

Al controlar la estructura de la cadena tanto como la velocidad de solidificación durante el enfriamiento, es posible impartir diferentes **grados de cristalinidad** a los polímeros, aunque nunca hasta el 100%. Los rangos de cristalinidad van desde un cristal casi completo (un máximo de 95% del volumen en el caso del polietileno) hasta polímeros ligeramente cristalizados (y en su mayor parte amorfos). El grado de cristalinidad también se ve afectado por la ramificación. Un polímero lineal puede llegar a ser altamente cristalino, un polímero altamente ramificado no puede serlo, aunque puede desarrollar cierto nivel de cristalinidad bajo, nunca logrará un alto contenido de cristalitas porque en un arreglo cristalino regular las ramas interfieren con la alineación de las cadenas.

Efectos de la cristalinidad. Las propiedades mecánicas y físicas de los polímeros se ven muy influenciadas por el grado de cristalinidad. A medida que aumenta la cristalinidad, los polímeros se vuelven más rígidos, más duros, menos dúctiles, más densos, menos elásticos y más resistentes a los solventes y al calor (figura 7.6). El aumento en la densidad con el incremento de la cristalinidad se llama *contracción por cristalización* y es causada por la compactación más eficiente de las moléculas en la red cristalina. Por ejemplo, la forma altamente cristalina del polietileno, conocida como polietileno de alta densidad (HDPE), tiene una gravedad específica en el rango de 0.941 a 0.970 (es entre 80 y 95% cristalino). Es más resistente, más rígido, más tenaz y menos dúctil que el polietileno de baja densidad (LDPE), que es aproximadamente entre 60 y 70% cristalino y tiene una gravedad específica en el intervalo que va de 0.910 a 0.925.

Las *propiedades ópticas* de los polímeros también se ven afectadas por el grado de cristalinidad. La reflexión de la luz a partir de las fronteras que hay entre las regiones cristalina y amorfa del polímero (figura 7.8) provoca opacidad. Además, debido a que el índice de refracción es proporcional a la densidad, cuanto mayor sea la diferencia de densidad entre las fases amorfa y cristalina, mayor será la opacidad del polímero. Los polímeros que son completamente amorfos pueden ser transparentes, como el policarbonato y los acrílicos.

7.2.3 Temperatura de transición vítrea

Aunque los polímeros amorfos no tienen un punto de fusión específico, experimentan un cambio distinto en su comportamiento mecánico dentro de un estrecho rango de temperaturas. A bajas temperaturas son duros, rígidos, frágiles y vítreos; a altas temperaturas son gomosos o correosos. La temperatura a la que se produce una transición se denomina **temperatura de transición vítrea** (T_g), también se le llama *punto vítreo* o *temperatura vítrea*. El término “vítreo” se utiliza en esta descripción porque los vidrios, que son sólidos amorfos, se comportan de igual manera (ver *vidrios metálicos*, sección 6.14, y *vidrios*, sección 8.4). Aunque la mayoría de los polímeros amorfos presentan este comportamiento, una excepción es el policarbonato, que no es rígido ni frágil por debajo de su temperatura de transición vítrea. El policarbonato es resistente a temperatura ambiente y, por lo mismo, se utiliza en la fabricación de cascos y escudos de seguridad.

Para determinar T_g , se produce una gráfica del volumen específico del polímero como una función de la temperatura; T_g ocurre cuando hay un cambio brusco en la pendiente de la curva (figura 7.9). En el caso de los polímeros altamente entrelazados, la pendiente de la curva cambia gradualmente cerca de T_g ; por lo tanto, para estos polímeros, puede ser difícil determinar T_g . La temperatura de transición vítrea varía con el tipo de polímero (tabla 7.2) y puede estar por encima o por debajo de la temperatura ambiente. A diferencia de los polímeros amorfos, los polímeros parcialmente cristalinos tienen un punto de fusión distinto, T_m (figura 7.9; vea también la tabla 7.2). Debido a los cambios estructurales (llamados cambios de primer orden) que ocurren, el volumen específico del polímero disminuye rápidamente a medida que se reduce su temperatura.

7.2.4 Mezclas de polímeros

El comportamiento frágil de los polímeros amorfos por debajo de su temperatura de transición vítrea puede reducirse al *mezclarlos*, por lo general, con pequeñas cantidades de un **elastómero** (sección 7.9). Las pequeñas partículas que componen el elastómero se dispersan por todo el polímero amorfo, mejorando su tenacidad y resistencia

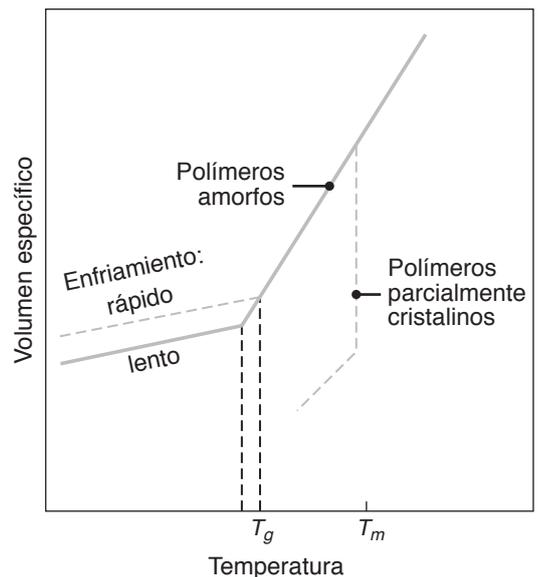


FIGURA 7.9 Volumen específico de los polímeros como una función de la temperatura. Los polímeros amorfos, como el acrílico y el policarbonato, tienen una temperatura de transición vítrea pero no un punto de fusión específico. Los polímeros parcialmente cristalinos, como el polietileno y el nailon, se contraen bruscamente al pasar por sus temperaturas de fusión durante el enfriamiento.

TABLA 7.2

Temperaturas de transición vítrea y fusión de algunos polímeros		
Material	T_g (°C)	T_m (°C)
Nailon 6,6	57	265
Polycarbonato	150	265
Poliéster	73	265
Polietileno		
Alta densidad	-90	137
Baja densidad	-110	115
Polimetilmetacrilato	105	—
Polipropileno	-14	176
Poliestireno	100	239
Politetrafluoroetileno	-90	327
Cloruro de polivinilo	87	212
Hule	-73	—

al impacto mediante la mejora de su resistencia a la propagación de grietas. Estas mezclas de polímeros se conocen como **polímeros modificados con hule**.

Mezclar polímeros implica la combinación de varios componentes, creando polimezclas que utilizan las propiedades favorables de diferentes polímeros. Las **mezclas miscibles** (mezcla sin separación de dos fases) se producen mediante un proceso similar a la aleación de metales que permite que las mezclas de polímeros sean más dúctiles. Las mezclas de polímeros representan aproximadamente 20% de toda la producción de polímeros.

7.3 Termoplásticos

Se ha señalado que dentro de cada molécula, los enlaces entre las moléculas de cadena larga adyacentes (enlaces secundarios) son mucho más débiles que los enlaces covalentes entre meros (enlaces primarios). La resistencia total del polímero está determinada por la

resistencia de los enlaces secundarios. Los polímeros lineales y ramificados tienen enlaces secundarios débiles.

A medida que la temperatura se eleva por encima de la temperatura de transición vítrea, T_g , o del punto de fusión, T_m , ciertos polímeros se vuelven más fáciles de formar o moldear como sea necesario. Cuando el polímero se enfría, regresa a su dureza y resistencia originales; es decir, el proceso es reversible. Los polímeros que presentan este comportamiento se conocen como **termoplásticos**; ejemplos comunes de éstos polímeros son los acrílicos, los materiales celulósicos, el nailon, los polietilenos y el cloruro de polivinilo.

El comportamiento de los termoplásticos también depende de otras variables, incluyendo su estructura y composición; entre las más importantes están la temperatura y la velocidad de deformación. Por debajo de la temperatura de transición vítrea, la mayoría de los polímeros son vítreos (frágiles) y se comportan como un sólido elástico. La relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal, como se muestra en la figura 2.2. El comportamiento depende del polímero particular. Por ejemplo, el PMMA es vítreo por debajo de su T_g , mientras que el policarbonato no es vítreo por debajo de su T_g . Cuando el esfuerzo aplicado se incrementa aún más, el policarbonato se fractura en algún momento, justo como lo hace una pieza de vidrio a temperatura ambiente.

En la figura 7.10 se muestran las curvas de esfuerzo-deformación típicas para algunos termoplásticos y termofijos a temperatura ambiente. Sus diversos comportamientos pueden ser descritos como rígido, blando, frágil, flexible, etc. Como puede observarse a partir de las propiedades mecánicas de los polímeros listados en la tabla 7.1, los termoplásticos son aproximadamente dos órdenes de magnitud menos rígidos que los metales y su resistencia máxima a la tensión es aproximadamente un orden de magnitud menor que la de los metales (vea la tabla 2.2).

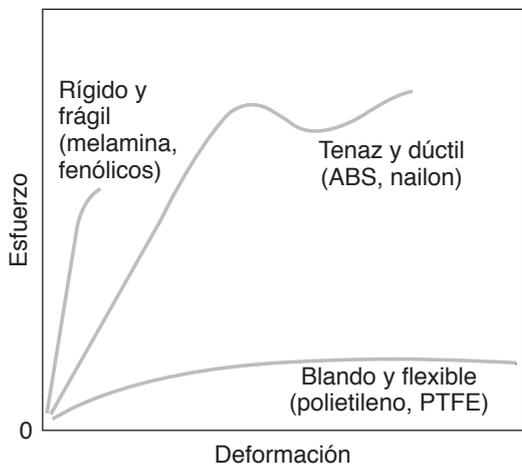


FIGURA 7.10 Terminología general que describe el comportamiento de tres tipos de plásticos. El nombre comercial del PTFE (politetrafluoroetileno) es Teflón. Fuente: Según R. L. E. Brown.

Efectos de la temperatura. Si la temperatura de un polímero termoplástico se eleva por encima de su T_g , primero se vuelve *correo*so y después, al aumentar la temperatura, se vuelve *gomoso* (figura 7.6). Por último, a temperaturas más elevadas (por encima de la T_m para los termoplásticos cristalinos), el polímero se convierte en un *fluido viscoso* y su viscosidad disminuye al aumentar la temperatura. Como un fluido viscoso, puede reblandecerse, moldearse en diversas formas, volverse a solidificar, volverse a fundir y volver a moldearse varias veces. Sin embargo, en la práctica, la repetición del calentamiento y el enfriamiento ocasiona **degradación** o **envejecimiento térmico** de los termoplásticos.

Tal como sucede con los metales, la resistencia y el módulo de elasticidad de los termoplásticos disminuyen al aumentar la temperatura, mientras que la ductilidad se incrementa (vea las figuras 2.6 y 7.11). El efecto de la temperatura sobre la resistencia al impacto se muestra en la figura 7.12, note la gran diferencia en el comportamiento al impacto entre los diferentes polímeros.

Efecto de la velocidad de deformación. Cuando los termoplásticos se deforman rápidamente, su comportamiento es similar al de los metales, como se demostró mediante el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación, m , en la ecuación (2.9). En general, los termoplásticos tienen un alto valor m , lo cual indica que pueden sufrir grandes *deformaciones uniformes* en tensión antes de la fractura. Observe en la figura 7.13 cómo, a diferencia de los metales ordinarios, la zona del cuello de la muestra se alarga considerablemente.

Este fenómeno puede demostrarse fácilmente al estirar un sujetador de plástico para un paquete de 6 latas y observar la secuencia de comportamiento de la formación de cuello y el estiramiento mostrados en la figura 7.13a. Esta característica, que es la misma de los metales superplásticos (sección 2.2.7), permite el termoformado de los termoplásticos (sección 19.6) en formas complejas tales como bandejas de dulces, señales luminosas y empaques.

Orientación. Cuando los termoplásticos se deforman (digamos por estiramiento), las moléculas de cadena larga tienden a alinearse en la dirección general de la elongación: un comportamiento llamado *orientación*. Igual que en los metales, el polímero se vuelve *anisotrópico* (vea también la sección 1.6): la muestra se vuelve más resistente y más rígida en la dirección alargada (estirada) que en su dirección transversal. El estiramiento es una técnica importante para mejorar la resistencia y la tenacidad de los polímeros y se explota especialmente en la producción de fibras de alta resistencia para su uso en materiales compuestos, como se describe en el capítulo 9.

Termofluencia y relajación del esfuerzo. Debido a su comportamiento viscoelástico, los termoplásticos son particularmente susceptibles a la termofluencia y a la relajación del esfuerzo en un grado mayor que los metales (sección 2.8). La magnitud de estos fenómenos depende del polímero particular, del nivel de esfuerzo, de la temperatura y del tiempo. Los termoplásticos presentan termofluencia y relajación del esfuerzo a temperatura ambiente, mientras que la mayoría de los metales lo hacen sólo a temperaturas elevadas.

Cuartheaduras (crazing).* Cuando algunos termoplásticos (como el poliestireno y el PMMA) se someten a esfuerzos de tensión o flexión, desarrollan regiones localizadas y estrechas en forma de cuña de un material altamente deformado, este comportamiento se conoce como *cuartheaduras*. Aunque pueden parecer grietas, las cuartheaduras son de un material esponjoso y, por lo general, contiene casi 50% de huecos. Con el aumento de la carga de tensión sobre la muestra, estos huecos se unen para formar una grieta que, eventualmente, puede conducir a la fractura del polímero. Las cuartheaduras se observan tanto en polímeros transparentes y vítreos como en otros tipos. El entorno (en particular la presencia de solventes, lubricantes o vapor de agua) puede intensificar la formación de cuartheaduras, llamadas en estos casos **agrietamiento por esfuerzo ambiental** y **cuartheaduras por solvente**. Los esfuerzos residuales presentes en el material también contribuyen a las cuartheaduras y al agrietamiento del polímero.

* (Nota del revisor técnico). No existe una traducción apropiada que refleje el fenómeno de crazing, lo cual se ha venido debatiendo en diversos foros desde hace tiempo dada su importancia como mecanismo de deterioro en los polímeros. El término "cuartheadura" refleja solamente la parte final de este mecanismo de deterioro.

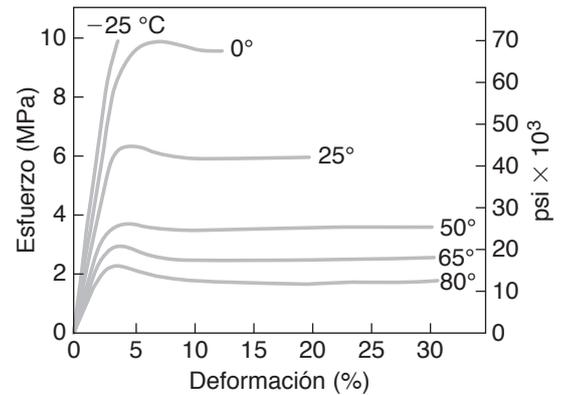


FIGURA 7.11 Efecto de la temperatura sobre la curva de esfuerzo-deformación para el acetato de celulosa, un termoplástico. Observe la gran disminución de la resistencia y el gran aumento de la ductilidad con un incremento relativamente pequeño en la temperatura. Fuente: Según T. S. Carswell y H. K. Nason.

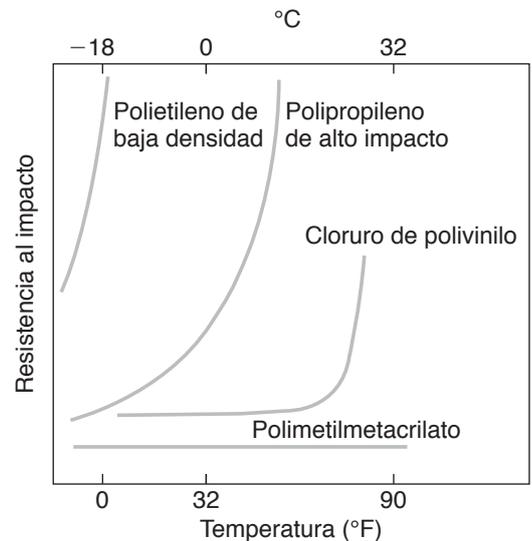


FIGURA 7.12 Efecto de la temperatura sobre la resistencia al impacto de varios plásticos. Los cambios pequeños en la temperatura pueden tener un efecto significativo sobre la resistencia al impacto. Fuente: Según P. C. Powell.

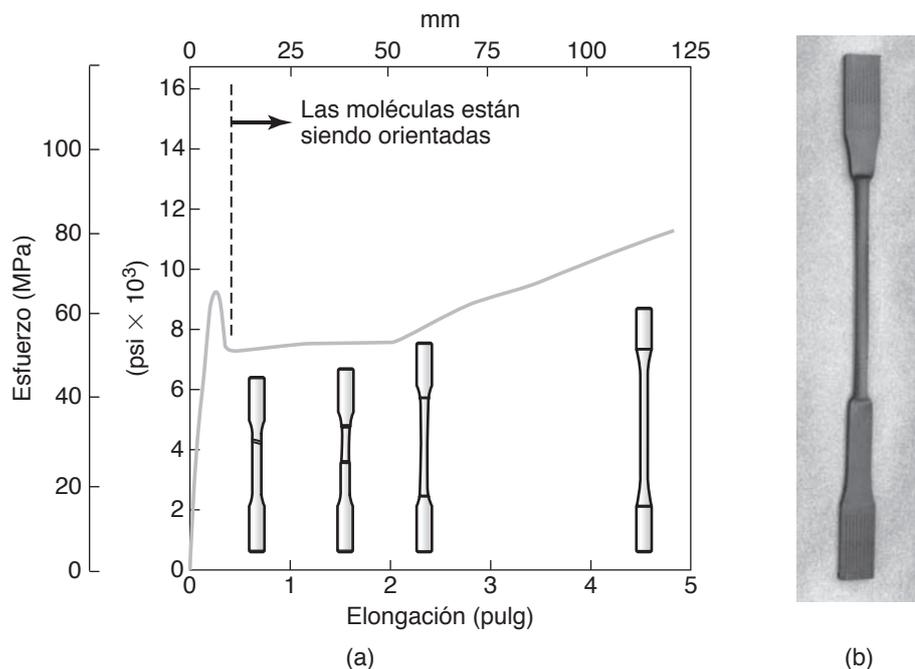


FIGURA 7.13 (a) Curva de esfuerzo-elongación para el policarbonato, un termoplástico. *Fuente:* Cortesía de R. P. Kambour y R. E. Robertson. (b) Muestra para pruebas a tensión, hecha de polietileno de alta densidad, que presenta elongación uniforme (la región larga y delgada en la muestra).

Un comportamiento relacionado con las cuarteaduras es el **blanqueamiento por esfuerzo**. Cuando el polímero se somete a esfuerzos de tensión (como los causados por flexión o plegado), se vuelve de un color más claro, fenómeno que suele atribuirse a la formación de microhuecos en el material. Como resultado, el polímero se hace menos translúcido (transmite menos luz) o más opaco. Este comportamiento se puede demostrar fácilmente doblando componentes de plástico que se encuentran comúnmente en las tiras de encuadernación de colores utilizadas para las cubiertas de informes, productos del hogar y juguetes.

Absorción de agua. Una característica importante de algunos polímeros, como el nailon, es su capacidad de absorber agua, conocida como comportamiento *higroscópico*; el agua actúa como un agente plastificante, haciendo que el polímero sea más plástico (vea la sección 7.5). En cierto sentido, lubrica las cadenas en las regiones amorfas. Por lo general, con el aumento de la absorción de humedad, la temperatura de transición vítrea, el esfuerzo de cedencia y el módulo elástico del polímero se reducen en forma rápida. También se producen cambios dimensionales, especialmente en un entorno húmedo.

Propiedades térmicas y eléctricas. En comparación con los metales, los plásticos se caracterizan generalmente por su baja conductividad térmica y baja gravedad específica eléctrica (que va desde 0.90 hasta 2.2), además de un alto coeficiente de dilatación térmica (aproximadamente con un orden de magnitud superior, como se muestra en las tablas 3.1 y 3.2). Dado que la mayoría de los polímeros tienen una baja conductividad eléctrica, pueden utilizarse en aisladores y como material de empaque para componentes electrónicos.

La conductividad eléctrica de algunos polímeros puede aumentarse mediante el **dopado** (introducción de impurezas, como polvos metálicos, sales y yoduros, en el polímero). Descubiertos a finales de la década de 1970, los **polímeros eléctricamente conductores** incluyen al óxido de polietileno, el poliácetileno, la polianilina, el polipirrol y politiofeno. La conductividad eléctrica de los polímeros aumenta con la absorción de humedad; sus

propiedades electrónicas también pueden modificarse por irradiación. Las aplicaciones de los polímeros conductores incluyen adhesivos, dispositivos microelectrónicos, baterías recargables, condensadores, catalizadores, celdas de combustible, sensores de nivel de combustible, paneles descongelantes, platos de radar, revestimientos antiestáticos y motores de accionamiento térmico (utilizados en aplicaciones de movimiento lineal, como antenas, quemacocos y ventanas eléctricas).

Se han desarrollado **polímeros térmicamente conductores** para aplicaciones que requieren estabilidad dimensional y transferencia de calor (como los disipadores de calor), así como para la reducción de los tiempos de ciclo en el moldeo y procesamiento de termoplásticos. Estos polímeros suelen ser termoplásticos (como el polipropileno, el policarbonato y el nailon) incrustados con partículas térmicamente conductoras. Su conductividad puede ser hasta 100 veces mayor que la de los plásticos convencionales (vea también herramientas de metal pulverizado, sección 20.6.1).

Polímeros con memoria de forma. Los polímeros también pueden comportarse de manera similar a las aleaciones con memoria de forma que se describieron en la sección 6.13. Estos polímeros pueden estirarse o comprimirse mediante grandes tensiones y después, cuando se someten al calor, a la luz o a un ambiente químico, recuperan su forma original. Las aplicaciones potenciales para estos polímeros son similares a las de las aleaciones con memoria de forma, como apertura de arterias bloqueadas, sondeo de neuronas en el cerebro y mejora de la tenacidad en las vértebras.

CASO DE ESTUDIO 7.2 Uso de polímeros eléctricamente conductores en baterías recargables

Una de las primeras aplicaciones de los polímeros conductores fue en las baterías recargables. Las baterías recargables modernas utilizan litio o un óxido de litio en el cátodo y carburo de litio (Li_xC_6) como ánodo, separados por una capa de polímero conductor. El litio es el más ligero de todos los metales y tiene un alto potencial electroquímico, de modo que su energía por unidad de volumen es la más alta.

El polímero, generalmente óxido de polietileno (PEO, por sus siglas en inglés), con una sal de litio disuelta, se coloca entre el cátodo y el ánodo. Durante la descarga de la batería, el Li_xC_6 se oxida, emitiendo electrones libres y iones de litio. Los electrones

quedan disponibles para los dispositivos eléctricos y los iones de Li^+ se almacenan en el polímero. Cuando el cátodo se agota, la batería debe recargarse para restaurar el cátodo. Durante la carga, se transfiere Li^+ a través de los electrolitos de polímero hacia el cátodo. Las baterías de iones de litio tienen una buena capacidad, pueden generar hasta 4.2 V cada una y pueden colocarse en serie para obtener voltajes más altos, tal como 18 V para las herramientas portátiles. En la actualidad, se están desarrollando celdas de batería en las que ambos electrodos están hechos de polímeros conductores; ya se construyó una con capacidad de 3.5 V.

7.4 Plásticos termofijos

Cuando las moléculas de cadena larga presentes en un polímero tienen enlaces cruzados en una disposición tridimensional, la estructura se convierte de hecho en una *molécula gigante* con fuertes enlaces covalentes. Estos polímeros se llaman **polímeros termofijos** o **termoestables** puesto que, durante la polimerización, la red se completa y la forma de la pieza se fija de manera permanente; esta reacción de **curado (entrelazamiento)**, a diferencia de la de los termoplásticos, es irreversible. La respuesta de un plástico termoestable a una temperatura suficientemente elevada puede compararse con la que ocurre cuando se hornea un pastel o hierve un huevo: una vez que el pastel se hornea y enfría, o el huevo se cuece y enfría, no es posible cambiar su forma por medio de recalentamiento.

Algunos materiales termofijos (como los epóxicos, el poliéster y el uretano) se curan a temperatura ambiente debido a que el calor producido por la reacción exotérmica es suficiente para curar el plástico. Un termofijo típico es el **fenólico**, un producto de la reacción entre fenol y formaldehído. Entre los productos comunes hechos a partir de este polímero están los mangos y las asas de ollas y sartenes y componentes de interruptores de luz y enchufes.

Por lo general, el proceso de polimerización para los termofijos se lleva a cabo en dos etapas. La primera ocurre en la planta química, donde las moléculas se polimerizan parcialmente en cadenas lineales. La segunda etapa tiene lugar en el paso final de producción de la pieza, donde se completa el entrelazamiento bajo *calor* y *presión* durante el moldeo y formado de la pieza (capítulo 19).

Los polímeros termofijos no tienen una temperatura de transición vítrea claramente definida. Debido a la naturaleza de sus enlaces, la resistencia y la dureza de un termofijo no se ven afectadas por la temperatura o la velocidad de deformación, a diferencia de los termoplásticos. Si la temperatura se incrementa lo suficiente, un polímero termofijo empieza a arder, degradarse y carbonizarse. Por lo general, los termofijos poseen mejores propiedades mecánicas, térmicas y químicas, mejor resistencia eléctrica y estabilidad dimensional que los termoplásticos.

7.5 Aditivos en los plásticos

Los polímeros usualmente se combinan con *aditivos* que modifican y mejoran ciertas características, como la rigidez, la resistencia mecánica, el color, la resistencia a la intemperie, la inflamabilidad, la resistencia al arco (para las aplicaciones eléctricas) y la facilidad de procesamiento posterior. Los aditivos pueden consistir en:

- **Plastificantes.** Éstos se añaden a los polímeros para impartir *flexibilidad* y *blandura* mediante la reducción de su temperatura de transición vítrea. Los *plastificantes* son solventes de bajo peso molecular con altos puntos de ebullición (no-volatilidad); reducen la fuerza de los enlaces secundarios entre las moléculas de cadena larga y, por lo tanto, hacen que el polímero sea flexible y blando. El uso más común de los plastificantes es en el PVC, que sigue siendo flexible durante sus numerosos usos; otras aplicaciones tienen lugar en láminas delgadas, películas, tubos, cortinas de ducha y materiales para prendas de vestir.
- **Colorantes.** La amplia variedad de colores disponibles en los plásticos se obtiene mediante la adición de *colorantes*, los cuales pueden ser *tintes* (orgánicos) o *pigmentos* (inorgánicos).
- **Rellenos.** Debido a su bajo costo, los *rellenos* son importantes para reducir el costo total de los polímeros. Dependiendo de su tipo, los rellenos también pueden mejorar la resistencia mecánica, la dureza, tenacidad, resistencia a la abrasión, estabilidad dimensional o la rigidez de los plásticos. Estas propiedades son mayores con porcentajes específicos en los diferentes tipos de combinación relleno-polímero. Por lo general, los rellenos son de harina de madera (aserrín fino), harina de sílice (polvo fino de sílice), arcilla, polvo de mica, talco, carbonato de calcio y fibras cortas de celulosa, vidrio o asbesto.
- **Retardantes de flama.** Si la temperatura es lo suficientemente alta, la mayoría de los polímeros se encienden y arden. La **inflamabilidad** (capacidad para sustentar la combustión) de los polímeros varía considerablemente, dependiendo de su composición (especialmente de su contenido de cloro y flúor). La inflamabilidad de los polímeros puede reducirse al fabricarlos con materias primas menos inflamables o mediante la adición de retardantes de flama, tales como los compuestos de cloro, bromo y fósforo. El entrelazamiento también reduce la inflamabilidad del polímero.
- **Otros aditivos.** La mayoría de los polímeros se ven afectados adversamente por la *radiación ultravioleta* (por ejemplo, la proveniente de la luz solar) y por el *oxígeno*, los cuales debilitan y rompen los enlaces primarios y causan la escisión (división)

de las moléculas de cadena larga. Enseguida, el polímero se degrada y se vuelve rígido y frágil. Un ejemplo típico de la protección contra la radiación ultravioleta es la composición de algunos tipos de plástico y hule con **negro de carbón** (hollín). La protección contra la degradación causada por oxidación, particularmente a elevadas temperaturas, se logra al añadir **antioxidantes** al polímero.

7.6 Propiedades generales y aplicaciones de los termoplásticos

En esta sección presentamos un resumen de las características generales y las aplicaciones típicas de las principales clases de termoplásticos, particularmente en lo relativo a la manufactura y a la vida útil de productos y componentes de plástico. En la tabla 7.3 se proporcionan recomendaciones generales para diversas aplicaciones de los plásticos y, en la tabla 7.4, se listan algunos de los nombres comerciales más comunes de los termoplásticos.

Los **acetales** (de *acético* y *alcohol*) tienen buena resistencia mecánica y rigidez y buena resistencia a la cedencia, abrasión, humedad, el calor y los productos químicos. Las aplicaciones típicas incluyen piezas mecánicas y componentes que requieren alto rendimiento durante un largo periodo (por ejemplo, cojinetes, levas, engranes, chumaceras y rodillos), impulsores, superficies de desgaste, tuberías, válvulas, regaderas y carcasas.

TABLA 7.3

Recomendaciones generales para productos de plástico		
Requisitos de diseño	Aplicaciones típicas	Plásticos
Resistencia mecánica	Engranes, levas, cilindros, válvulas, aspas de ventilador, impulsores, pistones.	Acetales, nailon, compuestos fenólicos, policarbonatos, poliésteres, polipropilenos, epóxicos, poliimididas.
Resistencia al desgaste	Engranes, bandas y revestimientos de desgaste, cojinetes, bujes, patines.	Acetales, nailon, compuestos fenólicos, poliimididas, poliuretano, polietileno de ultra alto peso molecular.
Propiedades de fricción		
Alta	Neumáticos, superficies antideslizantes, calzado, pisos.	Elastómeros, hules.
Baja	Superficies deslizantes, articulaciones artificiales	Fluorocarbonos, poliésteres, poliimididas.
Resistencia eléctrica	Todos los tipos de componentes y equipos eléctricos, electrodomésticos, aparatos eléctricos.	Polimetilmetacrilato, ABS, fluorocarbonos, nailon, policarbonato, poliéster, polipropileno, ureas, siliconas, fenólicos, hules.
Resistencia química	Contenedores para productos químicos, equipo de laboratorio, componentes para la industria química, envases de alimentos y bebidas.	Acetales, ABS, epóxicos, polimetilmetacrilato, fluorocarbonos, nailon, policarbonato, poliéster, polipropileno, ureas, siliconas.
Resistencia al calor	Electrodomésticos, utensilios de cocina, componentes eléctricos.	Fluorocarbonos, poliimididas, siliconas, acetales, polisulfonas, compuestos fenólicos, epóxicos.
Funcional y decorativa	Manijas, perillas, cubiertas de cámaras y baterías, molduras, accesorios de tubería.	ABS, acrílicos, materiales celulósicos, compuestos fenólicos, polietilenos, polipropilenos, poliestirenos, cloruro de polivinilo.
Funcional y transparente	Lentes, visores sumergibles (goggles), cristales de seguridad, señalamientos, equipos para el procesamiento de alimentos, equipos de laboratorio.	Acrílicos, policarbonatos, poliestirenos, polisulfonas.
Carcasas y formas huecas	Herramientas eléctricas, carcasas, cascos deportivos, casetas telefónicas.	ABS, celulósicos, compuestos fenólicos, policarbonatos, polietilenos, polipropileno, poliestirenos.

TABLA 7.4**Nombres comerciales de polímeros termoplásticos**

Acetal: Delrin, Duracon, Lupital, Ultraform.
Acrílico: Lucite, Acrylite, Acristeeel, Cyrolite, Diakon, Implex, Kamax, Korad, Plexiglass, XT, Zylar.
Acrílico-cloruro de polivinilo: Kydex.
Acrilonitrilo-butadieno-estireno: Cycolac, Delta, Denka, Magnum, Novodur, Royalite, Terluran.
Aramida: Kevlar.
Fluorocarbono: Teflón (politetrafluoroetileno).
Poliamida: Capron, Celanese, Durethan, Grilamid, Maranyl, Nylon, Rilsan, Ultramid, Vespel, Vydne, Zytel.
Policarbonato: APEC, Calibre, Hyzod, Lexan, Makrolon, Merlon.
Poliéster: Dacron, Eastpac, Ektar, Kodel, Mylar, Rynite.
Polieterimida: Ultem.
Poliétileno: Alathon, Dowlex, Forar, Fortiflex, Hostalen, Marlex, Petrothene.
Poliimida: Aurum, Avimid, Estamid, Envex, Kapton, Lenzing, VTEC.
Polifenileno: Forton, Fortron, Noryl.
Polipropileno: Fortilene, Oleplate, Olevac, Pro-Fax.
Poliestireno: Dylene, Fosta Tuf-Flex, Fostalite, Fostarene, Lustrex, Polystrol, Styron, Syrofoam.
Polisulfona: Mindel, Udel.
Poliuretano: Estane, Isoplast, Pellethane.
Cloruro de polivinilo: Fiberloc, Geon, Saran, Sintra, Tygon.
Fluoruro de polivinilideno: Forafon, Kynar.
Estireno-metacrilato de metilo: Zerlon.

Los **acrílicos** (como el PMMA) poseen resistencia mecánica moderada, buenas propiedades ópticas y resistencia a la intemperie. Son transparentes (pero pueden hacerse opacos), por lo general, son resistentes a los productos químicos y tienen buena resistencia eléctrica. Las aplicaciones típicas incluyen lentes ópticas, señalamientos luminosos, pantallas, cristales de ventanas, tragaluces, lentes de faros automotrices, parabrisas, lámparas y muebles.

El **acrilonitrilo-butadieno-estireno** es rígido y dimensionalmente estable. Tiene buena resistencia al impacto, a la abrasión y a los químicos; buena resistencia mecánica y tenacidad; buenas propiedades a bajas temperaturas y alta resistencia eléctrica. Las aplicaciones típicas incluyen tuberías, accesorios, equipos de plomería cromados, cascos, mangos de herramientas, componentes automotrices, cascos de barcos, teléfonos, artículos de equipaje, carcasas, electrodomésticos, revestimientos de refrigerador y paneles decorativos.

Los **celulósicos** tienen una amplia variedad de propiedades mecánicas, dependiendo de su composición. Se pueden hacer rígidos, resistentes y tenaces; sin embargo, son poco resistentes al clima y se ven afectados por el calor y los productos químicos. Las aplicaciones típicas incluyen mangos de herramientas, plumas, perillas, marcos para anteojos, lentes de seguridad, guardas de máquinas, cascos, tubos y tuberías, accesorios de iluminación, contenedores rígidos, volantes, películas de embalaje, señalamientos, bolas de billar, juguetes y piezas decorativas.

Los **fluorocarbonos** poseen buena resistencia a las altas temperaturas [por ejemplo, el *Teflón* tiene un punto de fusión de 327 °C (621 °F)], a los productos químicos, al tiempo y a la electricidad. También tienen propiedades adhesivas únicas y baja fricción. Las aplicaciones típicas incluyen forros para equipos de tratamiento químico, recubrimientos antiadherentes para utensilios de cocina, aislamiento eléctrico a altas temperaturas para alambres y cables, juntas, superficies de baja fricción, cojinetes y sellos.

Las **poliamidas** (de las palabras *poli*, *amina* y *ácido carboxílico*) están disponibles en dos tipos principales: *nailons* y *aramidas*:

- Los **nailons** tienen buenas propiedades mecánicas y resistencia a la abrasión; también son autolubrificantes y resistentes a la mayoría de los productos químicos. Todos los nailons son *higroscópicos* (absorben el agua), la absorción de humedad reduce las propiedades mecánicas deseables y aumenta las dimensiones de la pieza. Las aplicaciones típicas incluyen engranes, cojinetes, bujes, rodillos, sujetadores, cremalleras, partes eléctricas, peines, tubos, superficies resistentes al desgaste, guías y equipo quirúrgico.
- Las **aramidas** (poliamidas aromáticas) tienen muy alta resistencia a la tensión y rigidez. Las aplicaciones típicas incluyen fibras para plásticos reforzados, chalecos antibalas, cables y neumáticos radiales.

Los **policarbonatos** son versátiles; tienen buenas propiedades mecánicas y eléctricas, alta resistencia al impacto y se pueden hacer resistentes a los productos químicos. Las aplicaciones típicas incluyen cascos de seguridad, lentes ópticas, ventanas de vidrio a prueba de balas, señalamientos, botellas, equipos para el procesamiento de alimentos, parabrisas, componentes eléctricos de carga, aislantes eléctricos, aparatos médicos, componentes de maquinaria para oficina, guardas de máquinas y piezas que requieren estabilidad dimensional.

Los **poliésteres** (poliésteres termoplásticos; vea también la sección 7.7) tienen buenas propiedades mecánicas, eléctricas y químicas; buena resistencia a la abrasión y baja fricción. Las aplicaciones típicas incluyen engranes, levas, rodillos, miembros para el soporte de cargas, bombas y componentes electromecánicos.

Los **polietilenos** poseen buenas propiedades eléctricas y químicas; sus propiedades mecánicas dependen de la composición y estructura. Tres clases principales de polietileno son: (1) *de baja densidad* (LDPE), (2) *de alta densidad* (HDPE) y (3) *de peso molecular ultra alto* (UHMWPE). Las aplicaciones típicas de los LDPE y HDPE son artículos para el hogar, botellas, botes de basura, ductos, defensas, maletas, juguetes, tubos y materiales de embalaje. Los UHMWPE se utilizan en piezas que requieren tenacidad al alto impacto y resistencia al desgaste por abrasión; entre otros ejemplos se encuentran las articulaciones artificiales para rodillas y cadera.

Las **poliimididas** tienen la estructura de un termoplástico, pero la característica de no fusión de un termofijo (vea también la sección 7.7).

Los **polipropilenos** tienen buenas propiedades mecánicas, eléctricas y químicas, así como una buena resistencia a la rasgadura. Las aplicaciones típicas incluyen molduras y componentes de automóvil, dispositivos médicos, partes de electrodomésticos, aislamiento de cables, gabinetes de televisores, tuberías, accesorios, vasos para bebidas, envases para productos lácteos y jugos, equipaje, cuerdas y tiras para intemperismo (burletes).

Por lo general, los **poliestirenos** tienen propiedades medias y son algo frágiles, pero su costo es bajo. Las aplicaciones típicas incluyen envases desechables; empaques; bandejas para carnes, galletas y dulces; espuma aislante; electrodomésticos; componentes automotrices y de radio y televisión; artículos para el hogar y partes de juguetes y muebles (como sustituto de la madera).

Las **polisulfonas** tienen una excelente resistencia al calor, al agua y al vapor; poseen propiedades dieléctricas que permanecen prácticamente insensibles a la humedad, son altamente resistentes a algunas sustancias químicas, pero son sensibles al ataque de solventes orgánicos. Las aplicaciones típicas incluyen planchas de vapor, cafeteras, recipientes de agua caliente, equipo médico que requiere esterilización, herramientas eléctricas y electrodomésticos, carcasas interiores de las cabinas de avión y aisladores eléctricos.

El **cloruro de polivinilo** tiene una amplia variedad de propiedades, es barato y resistente al agua y puede hacerse rígido o flexible; no es adecuado para aplicaciones que requieren resistencia mecánica y resistencia al calor. El PVC *rígido* es resistente y duro; se utiliza para señalamientos y en el sector de la construcción (por ejemplo, en tuberías y conductos). El PVC *flexible* se utiliza en revestimientos de alambres y cables, en tubos y mangueras flexibles de baja presión, así como en el calzado, como piel de imitación, en tapicería, registros, juntas, sellos, películas, láminas y recubrimientos.

7.7 Propiedades generales y aplicaciones de los plásticos termofijos

En esta sección se describen las características generales y aplicaciones típicas de los principales plásticos termofijos.

Los **alquídicos** (de *alquilo*, que significa alcohol, y *ácido*) poseen buenas propiedades de aislamiento eléctrico, resistencia al impacto, estabilidad dimensional y baja absorción de agua. Las aplicaciones típicas son en componentes eléctricos y electrónicos.

Los **aminos** tienen propiedades que dependen de la composición; generalmente son duros, rígidos y resistentes a la abrasión, a la termofluencia y a la formación de arcos eléctricos. Las aplicaciones típicas incluyen carcasas de pequeños electrodomésticos, contratapas, asientos de inodoros, manijas y casquillos de distribuidor. La **urea** se utiliza típicamente en componentes eléctricos y electrónicos y la **melamina** en vajillas.

Los **epóxicos** tienen excelentes propiedades mecánicas y eléctricas, buena estabilidad dimensional, fuertes propiedades adhesivas y buena resistencia al calor y a los productos químicos. Las aplicaciones típicas incluyen componentes eléctricos que requieren resistencia mecánica y alto aislamiento; herramientas, troqueles y adhesivos. Los **epóxicos reforzados con fibra** tienen excelentes propiedades mecánicas y se utilizan en recipientes a presión, carcasas de motores para cohetes, tanques y componentes estructurales similares.

Los **fenólicos** son rígidos (aunque frágiles) y dimensionalmente estables; tienen alta resistencia al calor, al agua, a la electricidad y a los productos químicos. Las aplicaciones típicas incluyen perillas, manijas, paneles laminados y teléfonos; material de unión para conservar aglutinados los granos abrasivos en los esmeriles; además de componentes eléctricos (por ejemplo, dispositivos de cableado, conectores y aisladores).

Los **poliésteres** (poliésteres termofijos; vea también la sección 7.6) tienen buenas propiedades mecánicas, químicas y eléctricas; por lo general, están reforzados con fibras de vidrio (u otro material) y también están disponibles como resinas de colada. Las aplicaciones típicas incluyen barcos, maletas, sillas, carrocerías de automóvil, piscinas y materiales para la impregnación de tela y papel.

Las **poliimididas** poseen buenas propiedades mecánicas, físicas y eléctricas a temperaturas elevadas; también tienen una buena resistencia a la termofluencia, baja fricción y características de bajo desgaste. Las poliimididas tienen la característica de no fusión de un plástico termofijo, pero la estructura de un termoplástico. Las aplicaciones típicas incluyen componentes de bombas (cojinetes, sellos, asientos de válvulas, anillos de retención y anillos de pistón), conectores eléctricos para su uso a altas temperaturas, piezas aeroespaciales, estructuras con alta resistencia al impacto, equipos deportivos y chalecos de seguridad.

Las **siliconas** tienen propiedades que dependen de su composición; generalmente se desempeñan bien a la intemperie, poseen excelentes propiedades eléctricas en un amplio rango de humedad y temperatura y presentan resistencia a los productos químicos y al calor (sección 7.9). Las aplicaciones típicas incluyen componentes eléctricos que requieren resistencia a temperaturas elevadas, juntas de hornos, termosellados y materiales impermeables.

Peligros para la salud. Existe una creciente preocupación acerca de que algunos de los productos químicos utilizados en los polímeros pueden presentar riesgos para la salud, especialmente en productos de policarbonato como envases de agua y biberones, dispositivos médicos, equipos deportivos de seguridad y utensilios para comer. El agente químico que preocupa en forma particular es el bisfenol A (BPA), un producto ampliamente utilizado; se están llevando a cabo varias investigaciones en todo el mundo para determinar si existe algún vínculo con enfermedades humanas, especialmente las cardíacas y la diabetes.

CASO DE ESTUDIO 7.3 Materiales para forro de puertas de refrigerador

En la selección de materiales candidatos a ser usados como forro en las puertas de refrigerador (donde normalmente se almacenan huevos, mantequilla, aderezos para ensaladas y pequeñas botellas) deben considerarse los siguientes factores:

1. *Requisitos mecánicos*: resistencia mecánica, dureza (para soportar impactos, portazos y la estantería), rigidez, resiliencia y resistencia a los arañazos y al desgaste, así como a las temperaturas de operación.
2. *Requisitos físicos*: estabilidad dimensional y aislamiento eléctrico.
3. *Requisitos químicos*: resistencia a las manchas, los olores, las reacciones químicas con alimentos y bebidas y a los líquidos de limpieza.
4. *Apariencia*: color, estabilidad del color en el tiempo, acabado superficial, textura y tacto.
5. *Propiedades de manufactura*: métodos de manufactura y ensamble, efectos del procesamien-

to sobre las propiedades del material y sobre su comportamiento durante cierto periodo, compatibilidad con otros componentes de la puerta y costo de los materiales y de la manufactura.

Un extenso estudio, considerando todos los factores implicados, identificó dos materiales candidatos para usarse como forro de dichas puertas: ABS y HIPS (poliestireno de alto impacto). Un aspecto del estudio incluyó el efecto de los aceites vegetales, como el que contienen los aderezos para ensalada que se almacenan en los estantes de la puerta, sobre la resistencia de esos plásticos. Los experimentos mostraron que la presencia de aceites vegetales redujo significativamente la capacidad de soportar carga del HIPS. Se encontró que el HIPS se vuelve frágil en presencia de aceites (agrietamiento por esfuerzo disolvente), mientras que el ABS no se vio afectado en un grado significativo.

7.8 Plásticos biodegradables

Los residuos plásticos contribuyen aproximadamente con el 16% de los residuos sólidos urbanos en peso y constituyen entre el 50 y 80% de los desperdicios que abundan en las playas, los océanos y fondos marinos; con base en su volumen, aportan entre dos y tres veces su peso. Sólo alrededor de un tercio de la producción de plástico se usa en productos desechables, como botellas, empaques y bolsas para basura. Con el creciente uso de plásticos y una gran preocupación por las cuestiones ambientales relativas a la eliminación de los productos de plástico y a la escasez de vertederos, continúan realizándose esfuerzos importantes para desarrollar plásticos biodegradables.

Tradicionalmente, la mayoría de los productos de plástico se ha hecho a partir de polímeros sintéticos que se derivan de recursos naturales no renovables, no son biodegradables, y son difíciles de reciclar. **Biodegradabilidad** significa que especies microbianas presentes en el medio ambiente (por ejemplo, los microorganismos propios del suelo y del agua) degradarán todo el material polimérico o parte de éste en las condiciones ambientales adecuadas, sin generar subproductos tóxicos. Los productos finales de la degradación de la parte biodegradable del material son dióxido de carbono y agua. Debido a la variedad de constituyentes que tienen los plásticos biodegradables, pueden ser considerados como materiales compuestos y, en consecuencia, sólo una parte de ellos puede ser verdaderamente biodegradable.

Hasta ahora se han desarrollado tres diferentes *plásticos biodegradables*. Tienen diferentes características de degradabilidad y se degradan en diferentes periodos (desde algunos meses hasta unos pocos años).

1. El **sistema a base de almidón** es el más grande en términos de capacidad de producción. El almidón puede ser extraído de las papas, el trigo, arroz o maíz. Los gránulos de almidón se procesan en un polvo que se calienta y se convierte en un líquido pegajoso; después, el líquido se enfría y se forma en gránulos, los cuales se procesan en equipos convencionales para el procesamiento de plásticos. Con el al-

midón se mezclan varios aditivos y aglutinantes con el fin de impartir características específicas a los materiales bioplásticos; por ejemplo, se produce comercialmente un compuesto de polietileno y almidón como bolsas de basura degradables.

2. En el **sistema a base de ácido láctico**, las materias primas se fermentan para producir ácido láctico que después se polimeriza con el fin de formar una resina de poliéster. Los usos típicos incluyen aplicaciones médicas y farmacéuticas.
3. En la **fermentación de azúcar** se añaden ácidos orgánicos a una materia prima de azúcar. La reacción resultante produce un polímero altamente cristalino y muy rígido el cual, después de su transformación, se comporta de una manera similar a los polímeros elaborados a partir de petróleo.

Continúan realizándose estudios sobre la producción de plásticos totalmente biodegradables; en éstos se emplean diversos residuos agrícolas (*agrorresiduos*), carbohidratos vegetales, proteínas vegetales y aceites vegetales. Las aplicaciones típicas de este enfoque son:

- Vajillas desechables hechas de un sustituto de cereal, como granos de arroz o harina de trigo.
- Plásticos hechos casi en su totalidad a partir del almidón extraído de papa, trigo, arroz o maíz.
- Artículos plásticos a partir de granos de café y cáscaras de arroz, deshidratados y moldeados a presión y temperatura elevadas.
- Polímeros solubles en agua y compostables para uso médico y quirúrgico.
- Recipientes de alimentos y bebidas a base de fécula de papa, piedra caliza, celulosa y agua, que pueden disolverse en las alcantarillas y los océanos sin afectar la vida silvestre o marina.

Reciclaje de plásticos. Se siguen realizando muchos esfuerzos a nivel mundial para recoger y reciclar los productos plásticos utilizados. Los termoplásticos se reciclan mediante la fusión, la mezcla y el reformado en otros productos. Los artículos se marcan con *símbolos de reciclaje* (para la separación eficiente por tipos), en la forma de un triángulo esbozado mediante tres flechas en sentido horario y con un número en el centro. Estos números, establecidos en 1988 y utilizados internacionalmente, corresponden a los siguientes plásticos:

1. PETE (tereftalato de polietileno).
2. HDPE (polietileno de alta densidad).
3. V (vinilo) o PVC (cloruro de polivinilo).
4. LDPE (polietileno de baja densidad).
5. PP (polipropileno).
6. PS (poliestireno).
7. Otros, u O (acrílico, nailon, policarbonato, etcétera).

Los plásticos reciclados se utilizan cada vez más para una variedad de productos. Por ejemplo, un poliéster reciclado (con relleno de fibra de vidrio y minerales) se utiliza para la cubierta del motor de las camionetas pickup Ford serie F; tiene la rigidez adecuada, resistencia química y retención de la forma hasta 180 °C (350 °F).

7.9 Elastómeros (hules)

Las *elastómeros* (término derivado de la palabra *elástico* y *mero*) constan de una gran familia de polímeros amorfos (sección 7.2.1) que poseen una baja temperatura de transición vítrea. Tienen la capacidad característica de tolerar grandes deformaciones elásticas sin ruptura; también son blandos y tienen un módulo de elasticidad bajo.

La estructura de las moléculas de elastómero es altamente retorcida (ensortijada o rizada) cuando se estira, pero después vuelve a su forma original cuando se retira la carga

(figura 7.14). También pueden tener enlaces cruzados, de lo cual el mejor ejemplo es la elevada temperatura de **vulcanización** del hule con azufre, esta propiedad fue descubierta por el inventor estadounidense C. Goodyear en 1839 y llamada así por Vulcano, el dios romano del fuego. Una vez que el elastómero ha sido entrelazado no puede reformarse; por ejemplo, un neumático de automóvil, que posee moléculas gigantes, no puede ser ablandado y reformado.

Los términos *elastómero* y *hule* suelen usarse de manera indistinta. Sin embargo, un **elastómero** se define generalmente como capaz de recuperar de manera sustancial su forma y tamaño después que la carga se ha eliminado; un **hule** se define como capaz de recuperarse rápidamente a partir de grandes deformaciones.

La dureza de los elastómeros, que se mide con un durómetro (sección 2.6.1), aumenta con el entrelazamiento de las cadenas moleculares. Tal como sucede con los plásticos, existe una variedad de aditivos que pueden mezclarse en los elastómeros para impartirles propiedades específicas. Los elastómeros tienen una amplia gama de aplicaciones, como en superficies de alta fricción y antideslizantes, protección contra la corrosión y abrasión, aislamiento eléctrico, aislamiento contra choques y vibración. Algunos ejemplos son los neumáticos, las mangueras, las tiras contra el intemperismo, calzado, forros, juntas, sellos, rodillos de impresión y pisos.

Una propiedad única de los elastómeros es su pérdida de *histéresis* en el estiramiento o la compresión (figura 7.14). El ciclo señalado con sentido horario indica una pérdida de energía mediante la cual la energía mecánica se convierte en calor; esta propiedad es importante para la absorción de energía vibracional y el aislamiento del sonido.

Hule natural. La base para fabricar el *hule natural* es el **látex**, una savia lechosa obtenida de la corteza interior de un árbol tropical. El hule natural tiene buena resistencia a la abrasión, la fatiga y la alta fricción, pero baja resistencia al aceite, al calor, al ozono y a la luz solar. Las aplicaciones típicas son neumáticos, sellos, acoplamientos y montajes de motor.

Hules sintéticos. Algunos ejemplos de *hule sintético* son el butilo, estireno butadieno, polibutadieno, etileno y propileno. En comparación con el hule natural, tienen mejor resistencia al calor, a la gasolina y a los productos químicos, además de mayor rango de temperaturas útiles. Los hules sintéticos resistentes al aceite son el neopreno, nitrilo, uretano y la silicona. Las aplicaciones típicas de los hules sintéticos están en neumáticos, amortiguadores, sellos y cinturones.

Siliconas. Las *siliconas* (sección 7.7) tienen el más alto rango de temperaturas útiles entre los elastómeros (hasta 315 °C o 600 °F), pero sus propiedades, como la resistencia mecánica y la resistencia al desgaste y a los aceites, generalmente son inferiores a las de otros elastómeros comunes. Las aplicaciones de las siliconas están en sellos, juntas, aislamiento térmico, interruptores eléctricos de alta temperatura y aparatos electrónicos.

Poliuretano. Este elastómero tiene muy buenas propiedades generales de alta resistencia, rigidez y dureza, además de una excepcional resistencia a la abrasión, al corte y a la rasgadura. Las aplicaciones típicas del *poliuretano* están en sellos, juntas, amortiguadores, diafragmas para el formado con hule de hojas metálicas (sección 16.8) y partes de la carrocería de los automóviles.

RESUMEN

- Los polímeros son una clase importante de materiales que poseen una variedad muy amplia de propiedades mecánicas, físicas, químicas y ópticas. En comparación con los metales, los polímeros se caracterizan generalmente por (a) menores densidad, resistencia, módulo elástico, conductividad térmica y eléctrica y costo; (b) mayor relación de resistencia a peso, mayor resistencia a la corrosión y mayor dilatación térmica;

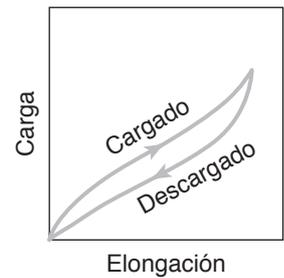


FIGURA 7.14 Curva típica de carga-elongación para los hules; el ciclo marcado en sentido horario, que indica las trayectorias de carga y descarga, muestra las pérdidas de histéresis. La histéresis proporciona a los hules la capacidad de disipar energía, amortiguar la vibración y absorber cargas de choque, tal como se requiere en los neumáticos de automóvil y en los amortiguadores de vibraciones que se colocan debajo de la maquinaria.

(c) amplia variedad de colores y transparencias y (d) mayor facilidad de manufactura en formas complejas.

- Los plásticos se componen de moléculas de polímero y diversos aditivos. A la unidad repetitiva más pequeña presente en una cadena de polímero se le denomina un mero. Los monómeros se unen mediante procesos de polimerización (condensación o adición) para formar moléculas más grandes. En los polímeros, la temperatura de transición vítrea separa la región de comportamiento frágil de la de comportamiento dúctil.
- Las propiedades de los polímeros dependen de su peso molecular, estructura (lineal, ramificada, entrelazada o en red), grados de polimerización y cristalinidad, así como de los aditivos presentes en su formulación. Los aditivos tienen funciones tales como mejorar la resistencia, el retraso de la flama y la lubricación, impartir flexibilidad y color y proporcionar estabilidad frente a la radiación ultravioleta y el oxígeno. Las estructuras poliméricas pueden modificarse utilizando diversos medios para impartirles una amplia gama de propiedades deseables.
- Dos clases importantes de polímeros son los termoplásticos y los termofijos. Los termoplásticos se vuelven blandos y fáciles de formar a temperaturas elevadas; su comportamiento incluye fenómenos como la cedencia y relajación del esfuerzo, agrietamiento y absorción de agua. Los termofijos, los cuales se obtienen por el entrelazamiento de cadenas poliméricas, no se vuelven blandos en una medida significativa al aumentar la temperatura; son mucho más rígidos y más duros que los termoplásticos.
- Los elastómeros tienen una capacidad característica para someterse a grandes deformaciones elásticas y luego regresar a su forma original al descargarse. En consecuencia, tienen importantes aplicaciones en neumáticos, sellos, calzado, mangueras, correas y amortiguadores.
- Entre las consideraciones importantes de los polímeros están su capacidad de reciclado y la posibilidad de que sean biodegradables. Ya existen varias formulaciones de plásticos biodegradables y otras se encuentran en desarrollo continuo.

TÉRMINOS CLAVE

Aditivos	Enlaces primarios	Orientación	Polímeros ramificados
Biodegradable	Enlaces secundarios	Peso molecular	Polimezclas
Blanqueamiento por esfuerzo	Envejecimiento térmico	Plásticos	Reciclaje
Colorantes	Grado de cristalinidad	Plastificantes	Rellenos
Cristalinidad	Grado de polimerización	Polimerización	Retardantes de flama
Cuartheaduras	Hule	Polímero	Siliconas
Curado	Látex	Polímeros con enlaces cruzados	Temperatura de transición vítrea
Degradación	Lubricantes	Polímeros con memoria de forma	Termofijos
Dopado	Mero	Polímeros en red	Termoplásticos
Elastómero	Mezclas	Polímeros lineales	Vulcanización
Enlaces	Monómero		

BIBLIOGRAFÍA

- Bhowmick, A. K. y Stephens, H. L., **Handbook of Elastomers**, 2a. ed., CRC Press, 2000.
- Buckley, C. P., Bucknall, C. B. y McCrum, N. G., **Principles of Polymer Engineering**, 2a. ed., Oxford University Press, 1997.
- Campo, E. A., **Selection of Polymeric Materials**, William Andrew, Inc., 2008.
- Chanda, M. y Roy S. K., **Plastics Technology Handbook**, 4a. ed., Marcel Dekker, 2006.
- Drobny, J. G., **Handbook of Thermoplastic Elastomers**, William Andrew, Inc., 2007.
- Fink, J. K., **High Performance Polymers**, William Andrew, Inc., 2008.

- Goodship, V., *Introduction to Plastics Recycling*, 2a. ed., Smithers Rapra Press, 2008.
- Harper, C., *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites*, 4a. ed., McGraw-Hill, 2003.
- Harper, C. A., *Modern Plastics Handbook*, McGraw-Hill, 2000.
- Khemani, K. y Scholz, C., *Degradable Polymers and Materials: Principles and Practice*, American Chemical Society, 2006.
- Kutz, M., *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*, Wilhelm Andrew, Inc., 2011.
- MacDermott, C. P. y Shenoy A.V., *Selecting Thermoplastics for Engineering Applications*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1997.
- Margolis, J., *Engineering Plastics Handbook*, McGraw-Hill, 2006.
- Mark, J. E. (ed.), *Physical Properties of Polymers Handbook*, 2a. ed., Springer, 2006.
- Michler, G. H. y Balta-Calleja, F. J., *Mechanical Properties of Polymers Based on Nanostructure and Morphology*, CRC Press, 2006.
- Mills, N., *Plastics: Microstructure and Engineering Applications*, 3a. ed., Butterworth-Heinemann, 2006.
- Mittal, V. (ed.), *High Performance Polymers and Engineering Plastics*, Wiley Scrinever, 2011.
- Owald, T. A. y Menges, G., *Materials Science of Polymers for Engineers*, 2a. ed., Hanser, 2003.
- Properties and Behavior of Polymers*, 2 vols., Wiley, 2011.
- Salamone, J. C. (ed.), *Concise Polymeric Materials Encyclopedia*, CRC Press, 1999.
- Strong, A. B., *Plastics: Materials and Processing*, 3a. ed., Prentice Hall, 2005.
- Ward, I. M. y Sweeny J., *An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers*, 2a. ed., Wiley, 2004.
- Xanthos, M., *Functional Fillers for Plastics*, 2a. ed., Wiley, 2010.
- Young, R. J. y Lovell, P., *Introduction to Polymers*, 3a. ed., CRC Press, 2008.
- Zweifel, H., Maier, H. y Schiller, M., *Plastics Additives Handbook*, 6a. ed., Hanser, 2009.

PREGUNTAS DE REPASO

- 7.1** Formule un resumen de las propiedades mecánicas y físicas más importantes de los plásticos.
- 7.2** ¿Cuáles son las principales diferencias entre las propiedades (a) mecánicas y (b) físicas de los plásticos y los metales?
- 7.3** Liste las propiedades que se ven influidas por el grado de polimerización.
- 7.4** ¿Cuál es la diferencia entre la polimerización por condensación y la polimerización por adición?
- 7.5** Explique las diferencias entre los polímeros lineales, ramificados y con enlaces cruzados.
- 7.6** ¿Qué es la temperatura de transición vítrea?
- 7.7** Liste y explique las propiedades de los aditivos que se utilizan en los plásticos.
- 7.8** ¿Qué son las cuarteaduras?
- 7.9** ¿Qué son las polimezclas?
- 7.10** Liste las principales diferencias entre los termoplásticos y los termofijos.
- 7.11** ¿Qué es un elastómero?
- 7.12** ¿Qué efectos tiene un agente plastificante sobre un polímero?
- 7.13** Defina las siguientes abreviaturas: PMMA, PVC, ABS, HDPE, UHDPE y LDPE.
- 7.14** Explique por qué sería ventajoso producir un polímero con alto grado de cristalinidad.
- 7.15** ¿Cuáles son las diferencias y similitudes de la polimerización por adición y por condensación?
- 7.16** ¿Están relacionados el peso molecular y el grado de polimerización? Explique su respuesta.
- 7.17** ¿Por qué los polímeros deben secarse antes de su procesamiento?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 7.18** ¿Qué características de los polímeros hacen atractivo su uso en las prendas de vestir?
- 7.19** ¿Los polímeros se endurecen por deformación más que los metales o viceversa? Explique su respuesta.
- 7.20** Revise diversos componentes plásticos en un automóvil e indique si están hechos de materiales termoplásticos o de plásticos termofijos.
- 7.21** Mencione aplicaciones en las que la inflamabilidad de los materiales plásticos tiene una gran importancia.
- 7.22** ¿Qué características hacen que los polímeros tengan ventajas en aplicaciones como los engranajes? ¿Qué características son inconvenientes en este tipo de aplicaciones?
- 7.23** ¿Qué propiedades tienen los elastómeros que generalmente no tienen los termoplásticos?
- 7.24** ¿Cree usted que la sustitución de plásticos en lugar de metales en los productos que tradicionalmente han sido metálicos puede ser vista de forma negativa por el público en general? Si es así, ¿por qué?

7.25 ¿Es posible que un material tenga un comportamiento histérico opuesto al mostrado en la figura 7.14, de modo que las dos flechas tengan un sentido antihorario? Explique su respuesta.

7.26 Observe el comportamiento de la muestra ilustrada en la figura 7.13 e indique si el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación, m (vea la sección 2.2.7), del material es alto o bajo.

7.27 Añada más aplicaciones a la columna correspondiente en la tabla 7.3.

7.28 Analice la importancia de la temperatura de transición vítrea, T_g , en las aplicaciones de ingeniería.

7.29 Describa cómo funciona una batería de litio recargable.

7.30 Explique la forma en que los enlaces cruzados mejoran la resistencia de los polímeros.

7.31 Describa los métodos mediante los cuales pueden alterarse las propiedades ópticas de los polímeros.

7.32 ¿Cómo puede lograrse que los polímeros sean conductores de electricidad? Explique.

7.33 Explique las razones por las que se desarrollaron los elastómeros.

7.34 Proporcione varios ejemplos de productos o componentes de plástico en los que la termofluencia y la relajación del esfuerzo sean consideraciones importantes.

7.35 Describa sus opiniones en relación con el reciclaje de plásticos comparado con el desarrollo de plásticos biodegradables.

7.36 Explique lo que haría usted para determinar la dureza de los plásticos.

7.37 Compare los valores del módulo de elasticidad, indicados en la tabla 7.1, con los valores dados para los metales en los capítulos 2, 5 y 6. Comente sus observaciones.

7.38 ¿Por qué hay tanta variación en la rigidez de los productos fabricados con polímeros? Explique.

7.39 Explique por qué los termoplásticos son más fáciles de reciclar que los termofijos.

7.40 Proporcione un ejemplo en el que las cuarteaduras sean deseables.

7.41 Describa el principio que está detrás de la envoltura por contracción.

7.42 Liste y explique algunas de las ventajas y desventajas ecológicas de la utilización de bolsas de plástico en comparación con las bolsas de papel.

7.43 Liste las características requeridas de un polímero para fabricar (a) una cubeta, (b) una pelota de golf, (c) un tablero de automóvil, (d) prendas de vestir, (e) pisos y (f) redes de pescar.

7.44 ¿Cómo se puede saber si una pieza está hecha de un termoplástico o de un plástico termofijo?

7.45 Como usted sabe, existen clips para papel hechos de plástico en varios colores. ¿Por qué no hay grapas de plástico?

7.46 Mediante la incorporación de pequeñas cantidades de un agente insuflante, es posible fabricar fibras de polímero huecas con núcleos de gas. Liste las posibles aplicaciones de estas fibras.

7.47 En las operaciones de moldeo por inyección (sección 19.3), una práctica común consiste en quitar la pieza de los sistemas de alimentación para colocarla en una trituradora y reciclar los gránulos resultantes. Liste los problemas que se tendrían al usar dichos gránulos reciclados en lugar de los llamados gránulos vírgenes.

7.48 Desde el punto de vista ecológico, ¿cree usted que lo mejor es incorporar polímeros en los diseños? ¿O es mejor incorporar metales? Explique su respuesta.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

7.49 Calcule las áreas bajo la curva de esfuerzo-deformación (tenacidad) para los materiales mostrados en la figura 7.11, grafíquelas como una función de la temperatura y describa sus observaciones.

7.50 Observe en la figura 7.11 que, como se esperaba, el módulo elástico del polímero disminuye a medida que aumenta la temperatura. Utilizando las curvas de esfuerzo-deformación de la figura, haga una gráfica del módulo de elasticidad contra la temperatura. Comente sobre la forma de la curva.

7.51 Una viga en voladizo rectangular con 75 mm de altura, 20 mm de ancho y 1 m de longitud se somete a una carga concentrada de 50 kg en su extremo. A partir de la tabla 7.1, seleccione tres materiales reforzados y tres no reforzados y calcule la deflexión máxima de la viga en cada caso. Después, seleccione

aluminio y acero para las mismas dimensiones de la viga, calcule la deflexión máxima y compare los resultados.

7.52 Calcule el número de moléculas presentes en un neumático común de automóvil; después calcule el número de átomos que hay en el neumático.

7.53 Usando datos de resistencia y densidad, determine el peso mínimo de un miembro a tensión con 1 m de longitud, el cual debe soportar una carga de 5000 N, si se fabrica con (a) polietileno de alto peso molecular, (b) poliéster, (c) PVC rígido, (d) ABS, (e) poliestireno y (f) nailon reforzado.

7.54 Grafique lo siguiente para cualesquier cinco polímeros descritos en este capítulo: (a) UTS contra densidad y (b) módulo elástico contra UTS. Cuando resulte apropiado, grafique un rango de valores.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

7.55 Realice una búsqueda en internet y describa la calorimetría de exploración diferencial. ¿Qué significa esta medida técnica?

7.56 Describa las consideraciones de diseño involucradas en la sustitución de un envase de bebida hecho de metal por uno hecho de plástico.

7.57 Suponga que usted está fabricando un producto en el que todos los engranajes están hechos de metal. Un vendedor le visita y le pide que considere la sustitución de algunos de estos engranajes de metal por otros de plástico. Haga una lista de las preguntas que usted plantearía antes de tomar una decisión.

7.58 Suponga que usted trabaja para una empresa que produce engranes de polímero. Ha concertado una reunión con un cliente potencial que actualmente utiliza engranes de metal. Haga una lista de los beneficios que presentan los engranes plásticos y prepare una presentación para la reunión con el cliente potencial.

7.59 En las secciones 7.6 y 7.7 se listan varios plásticos y sus aplicaciones. Reordene esa información y haga una tabla de productos (engranes, cascos, piezas de equipaje, artículos eléctricos, etc.) que muestre los tipos de plástico que pueden utilizarse para hacer estos productos.

7.60 Haga una lista de productos o piezas que actualmente no se fabrican con plástico e indique los posibles motivos de esto.

7.61 Revise las tres curvas que se muestran en la figura 7.10 y mencione algunas aplicaciones para cada tipo de comportamiento. Explique sus opciones.

7.62 Repita el problema 7.61 usando las curvas mostradas en la figura 7.12.

7.63 Con el fin de usar un contenedor de acero o aluminio para un líquido ácido, como la salsa de tomate, generalmente se coloca una barrera polimérica entre el recipiente y su contenido. Describa los métodos posibles para producir esa barrera.

7.64 Realice un estudio de los plásticos utilizados en algunos productos. Mida la dureza y la rigidez de esos plásticos. (Por ejemplo, los juguetes para masticar de los perros usan plásticos con una variedad de propiedades). Describa sus observaciones.

7.65 Agregue una columna a la tabla 7.1 que describa la apariencia de los plásticos, incluyendo los colores y la opacidad disponibles.

7.66 Con la tabla 7.3 como guía, inspeccione diversos productos, tanto en una cocina típica como en un automóvil, y describa los tipos de plásticos que se utilizan o podrían utilizarse en la fabricación de sus componentes individuales.

8

Cerámicos, vidrio, grafito, diamante y nanomateriales: estructura, propiedades generales y aplicaciones

8.1	Introducción	194
8.2	Estructura de los cerámicos	195
8.3	Propiedades generales y aplicaciones de los cerámicos	200
8.4	Vidrios	204
8.5	Vitrocerámicos	206
8.6	Grafito	207
8.7	Diamante	209
8.8	Nanomateriales	210

CASOS DE ESTUDIO:

8.1	Cuchillos cerámicos	198
8.2	Barril de pistola cerámico	203
8.3	Cojinetes de bola y rodillos cerámicos	203

- Los cerámicos, el vidrio y diversas formas del carbono poseen combinaciones únicas de propiedades físicas y mecánicas que no se pueden obtener con otros materiales metálicos o no metálicos.
- Los materiales cerámicos se describen primero en términos de su composición química, microestructura, sus propiedades mecánicas y físicas y sus aplicaciones.
- Los tipos básicos de cerámicos incluyen cerámicos de óxido tales como el óxido de aluminio o de circonio y carburos y nitruros.
- Los vidrios tienen numerosas formulaciones, todos contienen al menos 50% de sílice. Se describen sus propiedades generales y usos comunes.
- Existen diversas formas de carbono comercialmente importantes; el grafito es el más común con numerosos usos. Por ejemplo, se utiliza como refuerzo en materiales compósitos, en los electrodos para el maquinado por electroerosión y como lubricante sólido.
- El diamante es el material más duro que se conoce y, como tal, se utiliza para el maquinado de precisión y abrasivo, así como en operaciones de pulido.
- Los nanomateriales, como los nanotubos de carbono, se están volviendo cada vez más importantes con numerosas aplicaciones en dispositivos eléctricos y en la microelectrónica a nanoescala.

8.1 Introducción

Los diversos tipos de materiales descritos en los capítulos anteriores no son adecuados para ciertas aplicaciones, incluyendo:

1. Un aislante eléctrico para uso a altas temperaturas.
2. Baldosas de piso para resistir rayaduras y abrasión.
3. Un plato transparente para hornear.
4. Pequeños cojinetes de bola que sean ligeros, rígidos, duros y resistan altas temperaturas.
5. Parabrisas de automóvil que sean duros, resistentes a la abrasión y transparentes.

Es evidente, a partir de estos ejemplos, que las propiedades requeridas incluyen resistencia a altas temperaturas; dureza; inertidad a los productos químicos, alimentos y al medio ambiente; resistencia al desgaste y a la corrosión y baja conductividad eléctrica y térmica.

Primero se describen las características generales y las aplicaciones de los cerámicos, vidrios y vitrocerámicos que tienen importancia en las aplicaciones de ingeniería y la manufactura. Después se describen las diferentes formas de carbono (grafito, diamante y nanotubos de carbono) de acuerdo con sus propiedades y usos únicos. En el capítulo 18 se describe con detalle la fabricación de componentes de cerámicos y vidrio, así como diversas operaciones para dar forma y acabado; los materiales compósitos que contienen los materiales descritos se presentan en el capítulo 9.

8.2 Estructura de los cerámicos

Los cerámicos son compuestos de elementos metálicos y no metálicos. Con la expresión *cerámicos* (de los términos griegos *keramos*, que significa “arcilla de alfarería”, y *keramikos*, “productos de arcilla”) nos referimos tanto a los materiales como al producto cerámico en sí mismo. Debido al gran número de posibles combinaciones de elementos, en la actualidad existe una gran variedad de cerámicos para cubrir un amplio rango de aplicaciones industriales y de consumo. El primer uso de los cerámicos fue en la alfarería y ladrillos que datan de antes del año 4000 a. C. Los cerámicos se han vuelto cada vez más importantes como materiales para herramientas y dados, motores térmicos y componentes automotrices tales como revestimientos para escapes, bujías de automóvil, pistones recubiertos y camisas para cilindros.

Los cerámicos pueden dividirse en dos categorías generales:

1. **Cerámicos tradicionales**, como lozas, tejas, ladrillos, tubos de drenaje, alfarería y discos abrasivos.
2. **Cerámicos industriales**, también llamados **cerámicos ingenieriles**, de alta tecnología o **cerámicos finos**, con usos como componentes automotrices, turbinas y componentes estructurales y aeroespaciales (figura 8.1), intercambiadores de calor, semiconductores, sellos, prótesis y herramientas de corte.

La estructura de los cristales cerámicos, que contienen diversos átomos de diferentes tamaños, es una de las más complejas de todas las estructuras de materiales. Los enlaces

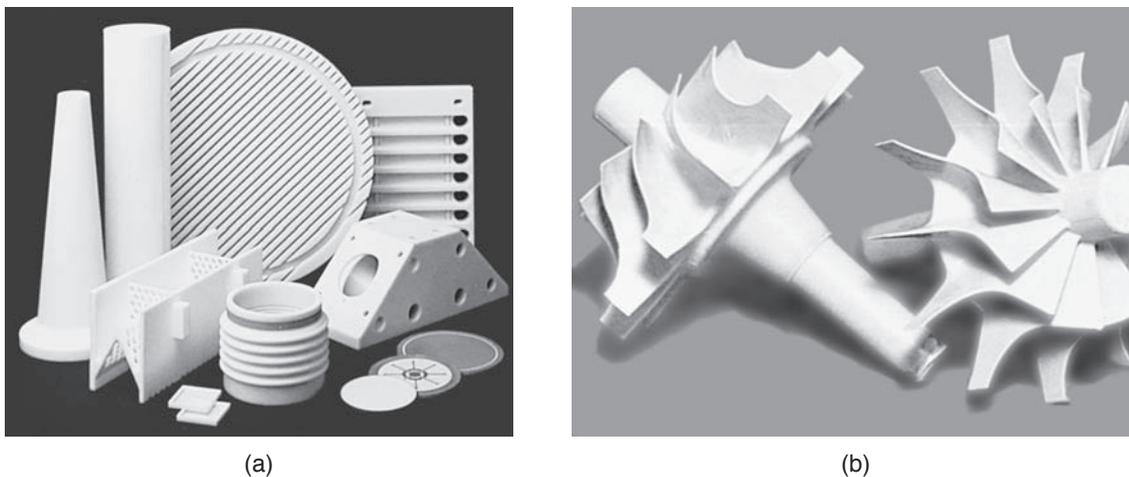


FIGURA 8.1 Diversidad de componentes cerámicos. (a) Alúmina de alta resistencia para aplicaciones a altas temperaturas. (b) Rotores de turbinas a gas hechos a partir de nitruro de silicio. Fuente: Cortesía de Wesgo Div, GTE.

presentes entre estos átomos suelen ser **covalentes** o **iónicos** (vea la sección 1.2) y, como tales, son mucho más fuertes que los enlaces metálicos. Por consiguiente, propiedades como la dureza y la resistencia térmica y eléctrica son significativamente más altas en materiales cerámicos que en metales (tablas 3.1 y 3.2). Los cerámicos están disponibles en forma *monocristalina* o *policristalina*. El tamaño de grano tiene una influencia importante en la resistencia y en las propiedades de los cerámicos; cuanto más fino sea el tamaño de grano (de ahí el término **cerámicos finos**), mayor será la resistencia y la tenacidad.

8.2.1 Materias primas

Entre las materias primas más antiguas utilizadas para la fabricación de cerámicos tenemos la **arcilla**, que posee una estructura plana de grano fino. El ejemplo más común es la *caolinita* (de Kaoling, una colina ubicada en China); ésta es una arcilla blanca constituida por silicato de aluminio con capas alternadas de iones de silicio y aluminio que están débilmente unidos (figura 8.2). Cuando a la caolinita se le añade agua, ésta se adhiere a las capas (*adsorción*), con lo que las capas se vuelven resbaladizas y la arcilla húmeda adquiere sus conocidas propiedades plásticas (*hidroplasticidad*) que la vuelven fácilmente formable.

Otras materias primas importantes utilizadas para elaborar los cerámicos y que se encuentran en la naturaleza son el **pedernal** (una roca compuesta por granos muy finos de sílice, SiO_2) y el **feldespato** (un grupo de minerales cristalinos que consisten en silicatos de aluminio y potasio, calcio o sodio). La **porcelana** es una **cerámica blanca** compuesta por caolín, cuarzo y feldespato; su uso más importante está en los electrodomésticos y en utensilios para la cocina y el baño. En su estado natural, estas materias primas generalmente contienen impurezas de diversos tipos que deben eliminarse antes de su transformación posterior en productos útiles.

8.2.2 Cerámicos de óxido

Hay dos grandes tipos de cerámicos de óxido: alúmina y zirconia (tabla 8.1).

Alúmina. También se le llama **corindón** o **esmeril**. La *alúmina* (óxido de aluminio, Al_2O_3) es el *cerámico de óxido* más ampliamente utilizado, ya sea en forma pura o como materia prima para ser mezclada con otros óxidos. Tiene una alta dureza y resistencia moderada. Aunque en la naturaleza existe alúmina, ésta contiene niveles variables de impurezas y posee propiedades no uniformes; en consecuencia, su rendimiento varía también. En la actualidad, el óxido de aluminio, el carburo de silicio y la mayor parte de los demás cerámicos se fabrican casi totalmente en forma sintética, de manera que su calidad puede controlarse a un nivel consistentemente alto. El óxido de aluminio sintético, fabricado por primera vez en 1893, se obtiene a partir de la fusión de bauxita fundida (un mineral de óxido de aluminio que es la principal fuente del aluminio), limaduras de hierro y coque en hornos eléctricos. Después que el producto se enfría se le tritura y clasifica por tamaño, haciéndolo pasar a través de cribas. El óxido de aluminio puede ser mezclado con pequeñas cantidades de otros materiales cerámicos, como óxido de titanio y carburo de titanio.

Las estructuras que contienen alúmina y otros óxidos diversos se conocen como **mulita** y **espinela** y son utilizadas como materiales refractarios para aplicaciones a altas temperaturas. Las propiedades mecánicas y físicas de la alúmina son adecuadas particularmente para aplicaciones como aislamientos eléctricos y térmicos, así como en herramientas de corte y abrasivos.

Zirconia. La zirconia (óxido de circonio, ZrO_2 , de color blanco) tiene buena dureza; buena resistencia al choque térmico, al desgaste y a la corrosión; baja conductividad térmica y bajo coeficiente de fricción. La **zirconia parcialmente**

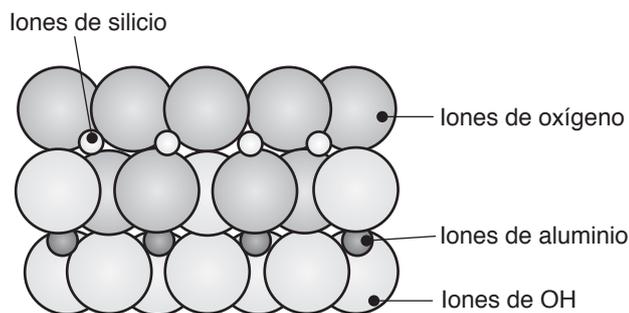


FIGURA 8.2 Estructura cristalina de la caolinita, conocida comúnmente como arcilla; compare esta figura con las figuras 1.3 a 1.5 para los metales.

TABLA 8.1

Tipos, características generales y principales usos de los cerámicos	
Tipo	Características generales y usos
Cerámicos de óxido	
Alúmina	Alta dureza y resistencia moderada; son los cerámicos más usados; herramientas de corte; abrasivos y aislamiento eléctrico y térmico.
Zirconia	Alta resistencia y tenacidad; dilatación térmica cercana a la del hierro fundido; adecuada para aplicaciones a altas temperaturas como revestimiento de hornos metalúrgicos, componentes de motores a reacción y revestimientos para combustible nuclear.
Carburos	
Carburo de tungsteno	Su dureza, resistencia mecánica y resistencia al desgaste dependen del contenido de cobalto como aglutinante; se usa en forma común para dados y herramientas de corte.
Carburo de titanio	No es tan tenaz como el carburo de tungsteno; usa el níquel y el molibdeno como aglutinantes; se utiliza en herramientas de corte.
Carburo de silicio	Resistencia a altas temperatura y resistencia al desgaste; se utiliza en motores térmicos y como abrasivo en piedras de esmeril.
Nitruros	
Nitruro de boro cúbico	Segunda sustancia más dura que se conoce, después del diamante; se utiliza como abrasivo y en herramientas de corte.
Nitruro de titanio	De color dorado; se utiliza como recubrimiento debido a sus bajas características de fricción.
Nitruro de silicio	Alta resistencia a la termofluencia y al choque térmico; utilizado en aplicaciones de alta temperatura como componentes de turbocompresor y elementos de rodamiento en cojinetes y herramientas de corte.
Sialón	Consta de nitruros de silicio y otros óxidos y carburos; se utiliza en herramientas de corte y tubos de alimentación, así como en revestimientos para la fundición de metales no ferrosos.
Cermets	Constan de óxidos, carburos y nitruros; se utilizan en aplicaciones a altas temperaturas, como herramientas de corte y armaduras compósitas para aplicaciones militares.
Sílice	Resistencia a altas temperaturas; el cuarzo presenta el efecto piezoeléctrico; los silicatos que contienen diversos óxidos se utilizan en aplicaciones no estructurales como fibra de vidrio, placa de vidrio y vidrio óptico.
Vidrios	Contiene al menos 50% de sílice; estructuras amorfas; hay disponibles diversos tipos con una amplia gama de propiedades mecánicas y físicas.
Vitrocerámicos	Tienen un alto componente cristalino en su estructura; buena resistencia al choque térmico y resistencia mecánica. Las aplicaciones comunes incluyen tapas vitrocerámicas y otros utensilios de cocina.
Grafito	Forma cristalina del carbono; alta conductividad eléctrica y térmica; buena resistencia al choque térmico; se utiliza como refuerzo estructural en materiales compósitos, electrodos para el maquinado por electroerosión y anillos de pistón.
Diamante	La sustancia más dura que se conoce; disponible en forma policristalina o monocristalina; se utiliza en herramientas de corte, abrasivos y dados para trefilado de alambre fino.
Nanotubos de carbono	Única forma cristalina del grafito con alta conductividad eléctrica y térmica; está bajo investigación para aplicaciones MEMS (microelectromecánicas) y microelectrónicas, así como en materiales compósitos.
Cerámicos de nanofase	Más resistente y más fácil de fabricar y maquinar que los cerámicos convencionales; se utiliza en aplicaciones automotrices y en motores a reacción.

estabilizada (PSZ, por sus siglas en inglés) tiene mayor resistencia y dureza y es más confiable en cuanto a rendimiento que la zirconia. Se obtiene mediante dopado del óxido de circonio con óxidos de calcio, itrio o magnesio; este proceso forma un material con partículas finas y tetragonales de óxido de circonio en una red cúbica. Las aplicaciones típicas incluyen dados para la extrusión de metales en caliente y perlas de circonio —utilizadas como medios de rectificado y pulido para recubrimientos aeroespaciales—, pintura base y pinturas automotrices e impresión fina sobre empaques flexibles para alimentos.

Dos características importantes de la zirconia parcialmente estabilizada son su alto coeficiente de dilatación térmica (que sólo es alrededor de 20% más bajo que el del hierro fundido) y su baja conductividad térmica (aproximadamente un tercio de la conductividad de los otros materiales cerámicos). Por consiguiente, la PSZ es muy adecuada para componentes de motores térmicos, tales como recubrimientos de cilindros y asientos de

válvulas, para ayudar a mantener intacto el ensamble del motor de hierro fundido. La **zirconia endurecida por transformación** (TTZ, por sus siglas en inglés) tiene mayor tenacidad debido a la dispersión de fases tenaces en la matriz cerámica.

CASO DE ESTUDIO 8.1 Cuchillos cerámicos

Los cuchillos cerámicos, generalmente hechos de óxido de circonio, se producen mediante un proceso que se describe en la sección 18.2. Inicia con un polvo cerámico mezclado con varios aglutinantes y compactado (moldeado) en tejos bajo alta presión. Después, los tejos se queman (sinterizan) a temperaturas por encima de 1000 °C (1830 °F) durante varios días. Una operación de prensado isostático en caliente puede ser usada para densificar y endurecer el cerámico (sección 17.3.2). Enseguida, los tejos se esmerilan y pulen con una rueda de diamante para formar un borde afilado y se añade el mango. La dureza Mohs (sección 2.6) del cerámico de óxido de circonio es 8.2, en comparación con el valor de 6 para el acero endurecido y un máximo de 10 para el diamante.

Entre las ventajas de los cuchillos cerámicos sobre los cuchillos de acero están: (a) debido a su muy alta dureza y resistencia al desgaste, los cuchillos cerámicos pueden durar meses e incluso años antes de requerir volverse a afilar. (b) Son químicamente inertes, de modo que no se oxidan y los alimentos no se les pe-

gan; por consiguiente, son fáciles de limpiar y no dejan sabor u olor metálicos. (c) Debido a que son ligeros, resultan más fáciles de usar.

Sin embargo, los cuchillos cerámicos deben almacenarse en bloques de madera especiales para cuchillos y ser manipulados con cuidado. Deben evitarse los impactos del filo contra otros objetos (como platos) o las caídas con el borde sobre una superficie dura, puesto que el filoso borde del cuchillo puede producir esquirlas. Asimismo, deben utilizarse sólo para cortar (no para hacer palanca); al cortar carne, no se recomienda el contacto con los huesos. Además, estos cuchillos deben afilarse en la fábrica para poder obtener un borde preciso utilizando ruedas de diamante. Los cuchillos cerámicos son comparables en precio a los cuchillos de acero de alta calidad, por lo general van de 20 a 80 dólares estadounidenses por un cuchillo liso de 3 pulgadas y de \$50 a \$200 por un cuchillo aserrado de 6 pulgadas.

Fuente: Cortesía de Kyocera Corporation.

8.2.3 Otros cerámicos

Carburos. Los *carburos* se utilizan típicamente como materiales para herramientas de corte y dados y como abrasivos, especialmente para las piedras de esmeril. Entre los ejemplos comunes de carburo están:

- El **carburo de tungsteno** (WC), que consiste en partículas de carburo de tungsteno con cobalto como aglutinante. La cantidad de aglutinante tiene gran influencia en las propiedades del material; la tenacidad aumenta con el contenido de cobalto mientras que la dureza, la fuerza y la resistencia al desgaste disminuyen.
- El **carburo de titanio** (TiC) tiene níquel y molibdeno como aglutinantes y no es tan duro como el carburo de tungsteno.
- El **carburo de silicio** (SiC) tiene buena resistencia al desgaste (por lo tanto es adecuado para usarse como abrasivo), al choque térmico y a la corrosión. Tiene un bajo coeficiente de fricción y conserva resistencia a temperaturas elevadas; así que resulta adecuado para componentes de alta temperatura de los motores térmicos. El carburo de silicio sintético, producido por primera vez en 1891, está hecho a partir de arena de sílice, coque y pequeñas cantidades de cloruro de sodio y aserrín; el proceso es similar al empleado para fabricar óxido de aluminio sintético (sección 8.2.2).

Nitruros. Ejemplos de *nitruros* son:

- El **nitruro de boro cúbico** (BNc), que es la segunda sustancia más dura que se conoce (después del diamante) y tiene aplicaciones especiales, como en herramientas de corte y en abrasivos para piedras de esmeril. No existe en la naturaleza y se fabricó

sintéticamente por primera vez en la década de 1970 usando técnicas similares a las empleadas para la fabricación de diamantes sintéticos (sección 8.7).

- El **nitruro de titanio** (TiN) se utiliza ampliamente como revestimiento para las herramientas de corte; mejora la vida de la herramienta debido a sus características de baja fricción.
- El **nitruro de silicio** (Si_3N_4) tiene una elevada resistencia a la termofluencia a elevadas temperaturas, baja dilatación térmica y alta conductividad térmica por lo que resiste los choques térmicos (sección 3.6); es adecuado para aplicaciones estructurales a altas temperaturas, como en los componentes de motores para automóvil y turbinas a gas, rodillos para seguidores de leva, cojinetes, boquillas de chorro de arena y componentes para la industria del papel.

Sialón. Derivado de las palabras *silicio*, *aluminio*, *oxígeno* y *nitrógeno*, el *sialón* consiste en nitruro de silicio con diversas adiciones de óxido de aluminio, óxido de itrio y carburo de titanio. Posee mayor resistencia mecánica y resistencia al choque térmico que el nitruro de silicio y se utiliza principalmente como el material de las herramientas de corte.

Cermets. Los *cermets* son combinaciones de una fase cerámica unida con una fase metálica. Introducidos en la década de 1960 y llamados también **cerámicos negros** o **cerámicos prensados en caliente**, combinan la resistencia a la oxidación a altas temperaturas de los cerámicos con la tenacidad, la resistencia al choque térmico y la ductilidad de los metales. Una aplicación común de los cermets se da en las herramientas de corte, con una composición típica de 70% de Al_2O_3 y 30% de TiC; otros cermets contienen diversos óxidos, carburos y nitruros.

Se han desarrollado cermets para aplicaciones de alta temperatura, como boquillas para motores a reacción y frenos para aeronaves, así como resistencias y capacitores que pueden experimentar altas temperaturas. Los cermets pueden considerarse como materiales *compósitos* y pueden usarse en varias combinaciones de cerámicos y metales unidos mediante técnicas de metalurgia de polvos (capítulo 17).

8.2.4 Sílice

La *silice*, que abunda en la naturaleza, es un material polimorfo —es decir, puede tener diferentes estructuras cristalinas—. La estructura cúbica se encuentra en ladrillos refractarios que se utilizan para aplicaciones de hornos a altas temperaturas. La mayoría de los vidrios contienen más de 50% de sílice. La forma más común de la sílice es el **cuarzo**, un cristal hexagonal abrasivo y duro que se utiliza ampliamente en aplicaciones de comunicaciones como un cristal oscilante de frecuencia fija ya que presenta el efecto piezoeléctrico (sección 3.7).

Los **silicatos** son productos de la reacción de la sílice con óxidos de aluminio, magnesio, calcio, potasio, sodio y hierro; algunos ejemplos son la arcilla, los asbestos, la mica y los vidrios de silicato. El **silicato de aluminio y litio** tiene una dilatación térmica y una conductividad térmica muy bajas, además de buena resistencia al choque térmico. Sin embargo, posee también resistencia mecánica y resistencia a la fatiga muy bajas; por lo tanto, sólo es adecuado para aplicaciones no estructurales como convertidores catalíticos, regeneradores y componentes de intercambiadores de calor.

8.2.5 Nanocerámicos y compósitos

Con el fin de mejorar la ductilidad y las propiedades de manufactura de los cerámicos, se les ha reducido el tamaño de partícula por medio de diversas técnicas, siendo las más comunes la condensación de gas, el uso de sol-geles o la síntesis por combustión. La estructura de estos materiales, llamados *nanocerámicos* o **cerámicos de nanofase**, consiste en grupos atómicos, cada uno de los cuales contiene unos cuantos miles de átomos. El control del tamaño de partícula, la distribución y la contaminación son importantes en los nanocerámicos, los cuales presentan ductilidad a temperaturas significativamente más bajas que los cerámicos convencionales y son más resistentes y fáciles de fabricar y maquinar con un menor número de defectos. Sus aplicaciones están en componentes au-

tomotrices como válvulas, balancines, rotores del turbocompresor, camisas para cilindros y en componentes de motores a reacción.

Las partículas y fibras nanocristalinas de segunda fase (del orden de 100 nm o menos) también se utilizan como refuerzos en materiales *compósitos* (capítulo 9). Estos compósitos tienen propiedades mejoradas tales como una superior resistencia a la tensión y a la termofluencia.

8.3 Propiedades generales y aplicaciones de los cerámicos

En comparación con los metales, los cerámicos suelen tener las siguientes características relativas: fragilidad; alta resistencia, módulo elástico y dureza a temperaturas elevadas; baja tenacidad, densidad y dilatación térmica y baja conductividad térmica y eléctrica. Debido a la amplia variedad de composiciones de material y tamaños de grano, las propiedades mecánicas y físicas de los cerámicos varían considerablemente. Las propiedades de los cerámicos también pueden variar ampliamente debido a su sensibilidad a las pequeñas fisuras, los defectos y las grietas superficiales o internas. La presencia de diferentes tipos y niveles de impurezas y distintos métodos de fabricación también afectan sus propiedades.

8.3.1 Propiedades mecánicas

En la figura 8.3 y en la tabla 8.2 se proporcionan las propiedades mecánicas de ciertos cerámicos ingenieriles seleccionados. Observe que su resistencia a la tensión (resistencia a la ruptura transversal, sección 2.5) es de aproximadamente un orden de magnitud menor que su resistencia a la compresión debido a su sensibilidad a las grietas, las impurezas y la **porosidad**. Estos defectos conducen a la iniciación y propagación de grietas bajo esfuerzos de tensión, lo que reduce significativamente la resistencia a la tensión de los cerámicos; por lo tanto, que sean reproducibles y confiables son aspectos importantes en la vida útil de los componentes cerámicos.

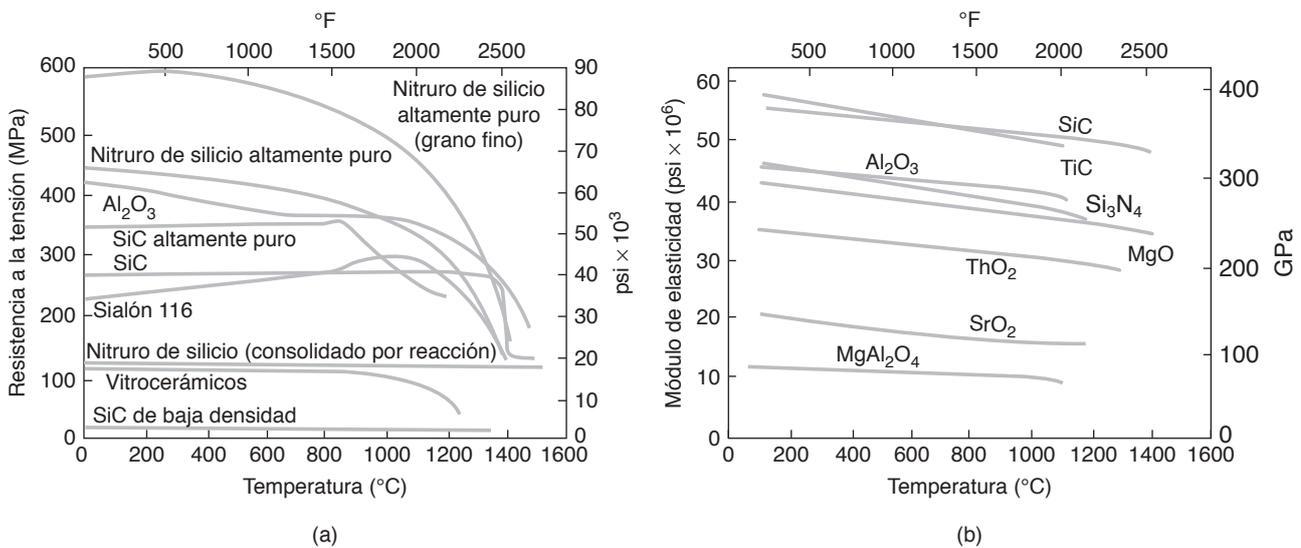


FIGURA 8.3 (a) Efecto de la temperatura sobre la resistencia de varios cerámicos ingenieriles; note que se mantiene una gran parte de la resistencia aun a temperaturas altas; compare esta gráfica con la figura 5.5. (b) Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad para diversos cerámicos; compare esta gráfica con la figura 2.6.

TABLA 8.2

Propiedades de diversos cerámicos a temperatura ambiente							
Material	Símbolo	Resistencia a la ruptura transversal (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Dureza (HK)	Módulo de Poisson, ν	Densidad (kg/m ³)
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	140-240	1000-2900	310-410	2000-3000	0.26	4000-4500
Nitruro de boro cúbico	BNc	725	7000	850	4000-5000	—	3480
Diamante	—	1400	7000	830-1000	7000-8000	—	3500
Sílice, fundida	SiO ₂	—	1300	70	550	0.25	—
Carburo de silicio	SiC	100-750	700-3500	240-480	2100-3000	0.14	3100
Nitruro de silicio	Si ₃ N ₄	480-600	—	300-310	2000-2500	0.24	3300
Carburo de titanio	TiC	1400-1900	3100-3850	310-410	1800-3200	—	5500-5800
Carburo de tungsteno	WC	1030-2600	4100-5900	520-700	1800-2400	—	10 000-15 000
Zirconia parcialmente estabilizada	PSZ	620	—	200	1100	0.30	5800

Nota: estas propiedades varían en forma amplia según la condición del material.

La resistencia a la tensión de los cerámicos policristalinos aumenta con la disminución del tamaño de grano y la porosidad. Esta relación está representada aproximadamente por la expresión

$$UTS = UTS_0 e^{-nP}, \quad (8.1)$$

donde P es la fracción del volumen de los poros presentes en el sólido; por lo tanto, si la porosidad es del 15%, $P = 0.15$, UTS_0 es la resistencia a la tensión con porosidad cero y el exponente n varía entre 4 y 7. El módulo de elasticidad de los cerámicos se relaciona con la porosidad mediante la expresión

$$E \approx E_0 (1 - 1.9P + 0.9P^2), \quad (8.2)$$

donde E_0 es el módulo elástico con porosidad cero.

A diferencia de la mayoría de los metales y termoplásticos, los cerámicos generalmente carecen de resistencia al impacto y al choque térmico debido a su inherente falta de ductilidad; una vez iniciada, una grieta se propaga rápidamente. Además de someterse a la ruptura por fatiga bajo cargas cíclicas, los cerámicos exhiben un fenómeno llamado **fatiga estática**, el cual también es presentado por los vidrios (sección 8.4). Cuando se someten a una carga de tensión estática en el transcurso del tiempo, estos materiales pueden fallar repentinamente, dicho fenómeno se produce en entornos en los que el vapor de agua está presente. La fatiga estática, que no ocurre en el vacío o en el aire seco, se ha atribuido a un mecanismo similar al agrietamiento por corrosión por esfuerzo de los metales (sección 2.10.2).

Los componentes cerámicos que van a someterse a esfuerzos de tensión pueden *pre-tensarse*, en gran medida de igual modo que el concreto pre-esforzado. El pre-esforzado de los componentes cerámicos formados los somete a esfuerzos de compresión; los métodos utilizados incluyen:

- Tratamiento térmico y temple químico (sección 18.4).
- Tratamiento superficial con láser (sección 34.8).
- Recubrimiento con cerámicos que tienen diferentes coeficientes de dilatación térmica (sección 3.6).
- Operaciones de acabado superficial, como el rectificado, en los que se inducen esfuerzos residuales de compresión en la superficie (sección 26.3).

Se han logrado avances importantes en la mejora de la tenacidad y otras propiedades de los cerámicos, como el desarrollo de **cerámicos maquinables** y **esmerilables** (sección

18.2.5). Entre estos avances están la selección y el procesamiento de materias primas; el control de la pureza y la estructura y el uso de refuerzos —con especial énfasis en los métodos avanzados de análisis del esfuerzo durante el diseño de los componentes cerámicos.

8.3.2 Propiedades físicas

La mayoría de los cerámicos tienen una gravedad específica relativamente baja que varía de entre 3 y 5.8 para los cerámicos de óxido, en comparación con un valor de 7.86 para el hierro (tabla 3.1). Tienen temperaturas de fusión o descomposición muy altas.

La conductividad térmica en los cerámicos varía hasta en tres órdenes de magnitud, según su composición, mientras que en los metales varía sólo en un orden de magnitud. Al igual que en otros materiales, la conductividad térmica de los cerámicos disminuye al aumentar la temperatura y la porosidad, puesto que el aire es un mal conductor térmico. La conductividad térmica, k , se relaciona con la porosidad por medio de la expresión

$$k = k_o (1 - P), \quad (8.3)$$

donde k_o es la conductividad térmica a porosidad cero y P es la porosidad como una fracción del volumen total.

La dilatación térmica y la conductividad térmica inducen esfuerzos internos que pueden conducir al choque térmico o a la fatiga térmica en los cerámicos. La tendencia hacia un **agrietamiento térmico** (llamado **descascarado** cuando se desprende un pequeño trozo o una capa de la superficie) es más baja con la combinación de una baja dilatación térmica y una alta conductividad térmica. Por ejemplo, la sílice fundida tiene una alta resistencia al choque térmico gracias a su dilatación térmica que es prácticamente igual a cero (vea también las secciones 3.5 y 3.6).

Las *propiedades ópticas* de los cerámicos pueden controlarse mediante el uso de diversas formulaciones y por control de la estructura. Estos métodos hacen posible la impartición de diferentes grados de transparencia y translucidez, así como de diversos colores. Por ejemplo, el zafiro monocristalino es completamente transparente, la zirconia es blanca y el óxido de aluminio policristalino de grano fino tiene un color gris translúcido. La porosidad influye en las propiedades ópticas de los cerámicos en gran medida en la misma forma que el aire atrapado en los cubos de hielo, que los hace menos transparentes y les da un aspecto blanquizco. Aunque los cerámicos son básicamente resistores, pueden volverse *eléctricamente conductores* mediante su aleación con ciertos elementos para que se comporten como semiconductores o incluso como superconductores.

8.3.3 Aplicaciones

Los cerámicos tienen numerosas aplicaciones industriales y de consumo. Existen diversos tipos de cerámicos que se utilizan en las industrias eléctrica y electrónica debido a que tienen alta resistividad eléctrica, alta resistencia dieléctrica (voltaje requerido para la descomposición eléctrica por unidad de espesor) y las propiedades magnéticas adecuadas en aplicaciones como los magnetos para bocinas.

La capacidad de los cerámicos para mantener su resistencia y rigidez a temperaturas elevadas los hace muy atractivos para aplicaciones de alta temperatura. Las mayores temperaturas de operación posibilitadas por el uso de componentes cerámicos implican un consumo más eficiente del combustible y la reducción de emisiones en los automóviles. Actualmente, los motores de combustión interna tienen sólo alrededor de 30% de eficiencia, pero con el uso de componentes cerámicos, el rendimiento puede mejorarse por lo menos en 30 por ciento.

Los cerámicos que se están utilizando con éxito, especialmente en componentes de motores automotrices de turbinas a gas (como rotores), son: el nitruro de silicio, el carburo de silicio y la zirconia parcialmente estabilizada. Otras propiedades atractivas de los cerámicos son su baja densidad y su alto módulo de elasticidad, los cuales permiten que el

peso del producto se reduzca y que las fuerzas de inercia generadas por las piezas móviles sean más bajas. Por ejemplo, los turbocompresores cerámicos son 40% más ligeros que los convencionales. Los componentes de alta velocidad para las máquinas herramientas también son candidatos a usar cerámicos (sección 25.3). Además, el alto módulo elástico de los cerámicos los hace atractivos para mejorar la rigidez de las máquinas, al tiempo que se reduce el peso. Su alta resistencia al desgaste también los hace adecuados para aplicaciones como camisas de cilindros, bujes, sellos, cojinetes y revestimientos para cañones de armas de fuego. El recubrimiento de metales con cerámicos es otra aplicación que se realiza a menudo para reducir el desgaste, evitar la corrosión o proporcionar una barrera térmica.

CASO DE ESTUDIO 8.2 Barril de pistola cerámico

La resistencia al desgaste y la baja densidad de los cerámicos condujo a investigaciones sobre su uso como recubrimientos para cañones de armas de fuego. Su éxito limitado llevó a desarrollos más recientes que permiten la fabricación de barriles de pistola a partir de cerámicos compósitos, los cuales han mejorado el rendimiento de los barriles de acero tradicionales. Por ejemplo, un barril cerámico calibre 50 hecho de zirconia se forma en varios segmentos separados, cada uno con longitud de entre 150 y 200 mm (6 y 8 pulg) y espesor de pared de 3.75 mm (0.150 pulg), usando los procesos de formado y sinterizado descritos en el capítulo 17.

Después, los segmentos se maquinan hasta las dimensiones y el acabado superficial requeridos. La zirconia se utiliza debido a su alta tenacidad, resistencia a la flexión, calor específico, temperatura de operación y muy baja conductividad térmica. Las propiedades té-

micas son importantes para el desempeño de un arma de fuego.

Enseguida, los segmentos cerámicos separados se ensamblan y el barril se envuelve con un compósito de matriz polimérica/fibra de carbono que lo somete a un esfuerzo de compresión de 100 000 psi, lo que mejora en gran medida su capacidad para soportar los esfuerzos de tensión desarrollados durante la combustión. Por último, el interior del cilindro se estría (se corta para producir ranuras internas en espiral que le dan rotación a la bala saliente con el fin de obtener estabilidad giroscópica) y se ajusta a la recámara de una pistola.

Fuente: Cortesía de K. H. Kohnken, Surface Conversion Technologies, Inc., Cumming, Georgia.

CASO DE ESTUDIO 8.3 Cojinetes de bola y rodillos cerámicos

Los cojinetes de bola y los rodillos cerámicos hechos a partir de nitruro de silicio (figura 8.4) se utilizan cuando existen condiciones de alta temperatura, alta velocidad o lubricación ligera. Los cojinetes pueden estar hechos enteramente de cerámicos, o bien es posible que solamente la bola y los rodillos sean de cerámicos y las pistas de metal, en cuyo caso se denominan *cojinetes híbridos*. Los ejemplos de aplicaciones para cojinetes cerámicos e híbridos incluyen husillos de máquinas herramientas, cabezales para costuras en latas metálicas, medidores de flujo a altas velocidades y cojinetes para motocicletas, go karts y motocicletas para nieve.

Las esferas cerámicas tienen tolerancia diametral de $0.13 \mu\text{m}$ ($5 \mu\text{pulg}$) y rugosidad superficial de $0.02 \mu\text{m}$

($0.8 \mu\text{pulg}$). Tienen también alta resistencia al desgaste, alta tenacidad a la fractura, baja densidad y se desempeñan bien con poca o ninguna lubricación. Su coeficiente de dilatación térmica es una cuarta parte del coeficiente del acero y pueden soportar temperaturas de hasta 1400°C (2550°F).

Producido a partir de titanio y nitruro de carbono utilizando técnicas de metalurgia de polvos, el carbonitruro de titanio de densidad total (TiCN) o el material de grado cojinete nitruro de silicio (Si_3N_4) pueden ser dos veces más duros y 40% más ligeros que el acero al cromo. Se han producido componentes de hasta 300 mm (12 pulg) de diámetro.

(continúa)



FIGURA 8.4 Selección de pistas y cojinetes cerámicos. Fuente: Cortesía de The Timken Company.

Biocerámicos. Debido a su fuerza e inertidad, los cerámicos también se utilizan como biomateriales (*biocerámicos*) para reemplazar articulaciones en el cuerpo humano, tal como en dispositivos protésicos y en el trabajo dental. Los biocerámicos que se utilizan de manera común son el óxido de aluminio, la hidroxiapatita (un mineral natural), el fosfato tricálcico, nitruro de silicio y diversos compuestos de sílice. Los implantes cerámicos pueden hacerse porosos, con lo que es posible el crecimiento de hueso dentro de la estructura porosa (como es el caso de los implantes de titanio porosos) y desarrollar un fuerte vínculo con la integridad estructural.

8.4 Vidrios

El **vidrio** es un sólido amorfo con la estructura de un líquido (figura 8.5), una condición que se obtiene por subenfriado (enfriamiento a una velocidad muy alta para permitir que se formen cristales). Técnicamente, el vidrio se define como un producto inorgánico de

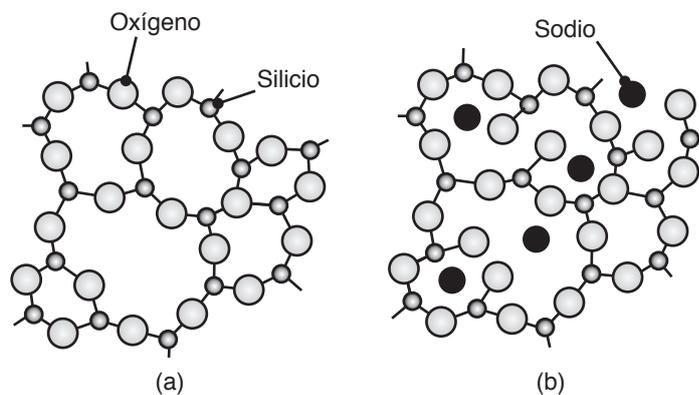


FIGURA 8.5 Ilustración esquemática de la estructura del vidrio de sílice. (a) Vidrio de sílice puro en la forma de estructura aleatoria $(\text{SiO}_2)_n$ y (b) vidrio parcialmente despolimerizado; note que existe un cuarto enlace para cada silicio que se encuentra fuera del plano mostrado.

fusión que se ha enfriado hasta un estado rígido sin cristalizar. El vidrio no tiene un punto de fusión o un punto de solidificación distintos, por lo que su comportamiento es similar al de las aleaciones amorfas (vidrios metálicos, vea la sección 6.14) y los polímeros amorfos (sección 7.2.2).

Las cuentas de vidrio se produjeron por primera vez alrededor del año 2000 a. C., y el arte del soplado de vidrio comenzó aproximadamente en 200 a. C. Hasta finales del siglo XVII sólo se utilizó la sílice para todos los productos de vidrio. La evolución rápida de los vidrios inició a comienzos del siglo XX. Hay alrededor de 750 diferentes tipos de vidrios disponibles en el mercado, con aplicaciones que van desde los vidrios para ventanas hasta vidrios para recipientes, utensilios de cocina, iluminación y teléfonos móviles; también existen vidrios con características mecánicas, eléctricas, de alta temperatura, antiquímicas, de corrosión y ópticas especiales. Se usan vidrios especiales en la fibra óptica (para comunicación mediante la luz con poca pérdida de potencia en la señal) y en **fibras de vidrio** con muy alta resistencia (para uso en plásticos reforzados, sección 9.2.1).

Todos los vidrios contienen al menos 50% de sílice, la cual se conoce como **formador de vidrio**. La composición y las propiedades de los vidrios pueden modificarse mediante la adición de óxidos de aluminio, sodio, calcio, bario, boro, magnesio, titanio, litio, plomo y potasio. Dependiendo de su función, estos óxidos se conocen como **intermedios o modificadores**.

8.4.1 Tipos de vidrios

Casi todos los *vidrios comerciales* se clasifican en los siguientes tipos (tabla 8.3):

- Vidrio sódico-cálcico (el tipo más común).
- Vidrio de plomo-álcali.
- Vidrio de borosilicato.
- Vidrio de aluminosilicato.
- Vidrio 96% de sílice.
- Vidrio de sílice fundida.

Los vidrios también se clasifican como de color, opacos (blancos y traslúcidos), multiformes (variedad de formas), ópticos, fotocromáticos (se oscurecen al exponerse a la luz, como en unas gafas de sol), fotosensibles (cambian de transparente a opaco), fibrosos (estirados en forma de fibras largas, como en la fibra de vidrio) y en espuma o celulares (contienen burbujas, por lo que son buenos aislantes térmicos). Los vidrios también pueden ser referidos como **duros** o **blandos**, por lo general, en el sentido de una propiedad térmica y no mecánica (vea también dureza de los vidrios, sección 8.4.2); en consecuencia, un vidrio blando se ablanda a una temperatura más baja de lo que lo hace

TABLA 8.3

Propiedades de vidrios diversos					
Propiedad	Vidrio sódico-cálcico	Vidrio de plomo-álcali	Vidrio de borosilicato	96% de sílice	Sílice fundida
Densidad	Alta	La más alta	Media	Baja	La más baja
Resistencia	Baja	Baja	Moderada	Alta	La más alta
Resistencia al choque térmico	Baja	Baja	Buena	Mejor	La mejor
Resistividad eléctrica	Moderada	La mejor	Buena	Buena	Buena
Formabilidad en caliente	Buena	La mejor	Suficiente	Mala	La peor
Tratabilidad térmica	Buena	Buena	Mala	Ninguna	Ninguna
Resistencia química	Mala	Suficiente	Buena	Mejor	La mejor
Resistencia al impacto y a la abrasión	Suficiente	Mala	Buena	Buena	La mejor
Transmisión de luz ultravioleta	Mala	Mala	Suficiente	Buena	Buena
Costo relativo	El más bajo	Bajo	Medio	Alto	El más alto

un vidrio duro. Los vidrios sódico-cálcicos y de plomo-álcali se consideran blandos y el resto son duros.

8.4.2 Propiedades mecánicas

El comportamiento del vidrio, igual que el de la mayoría de los cerámicos, suele considerarse perfectamente elástico y frágil. El módulo de elasticidad para los vidrios comerciales oscila entre 55 y 90 GPa (entre 8 y 13 millones de psi) y su módulo de Poisson desde 0.16 hasta 0.28. La dureza de los vidrios, como una medida de la resistencia al rayado, oscila entre 5 y 7 en la escala Mohs, que es equivalente a un rango aproximado de entre 350 y 500 HK (vea la figura 2.15).

Por lo general, el vidrio en forma **volumétrica** tiene una resistencia inferior a 140 MPa (20 ksi). La relativamente baja resistencia del vidrio se atribuye a la presencia de pequeños defectos y microgrietas en su superficie, algunas de las cuales, o todas, pueden introducirse durante el manejo normal del vidrio mediante su abrasión inadvertida. Estos defectos reducen la resistencia del vidrio de dos a tres órdenes de magnitud, en comparación con su resistencia ideal (libre de defectos). Los vidrios se pueden reforzar mediante tratamientos térmicos o químicos para obtener alta resistencia y tenacidad (sección 18.4).

En teoría, la resistencia del vidrio puede llegar a 35 GPa (5 millones de psi). Cuando el vidrio fundido se estira en fibras (**fibra de vidrio**), su resistencia a la tensión oscila entre 0.2 y 7 GPa (de 30 a 1000 psi), promediando alrededor de 2 GPa (300 ksi). Estas fibras son más resistentes que el acero y se utilizan para reforzar plásticos en aplicaciones tales como barcos, carrocerías de automóvil, muebles y equipos deportivos (vea las tablas 2.2 y 9.2).

8.4.3 Propiedades físicas

Los vidrios se caracterizan por tener baja conductividad térmica y alta resistividad eléctrica y resistencia dieléctrica. Su coeficiente de dilatación térmica es más bajo que el de los metales y plásticos, puede incluso aproximarse a cero. Por ejemplo, el vidrio de silicato de titanio (un vidrio claro de alta sílice sintética) tiene un coeficiente de dilatación térmica casi nulo. La sílice fundida (un vidrio dióxido de silicio amorfo, sintético y claro, de muy alta pureza) también tiene un coeficiente de dilatación cercano a cero. Propiedades ópticas de los vidrios como la reflexión, absorción, transmisión y refracción pueden modificarse al variar su composición y tratamiento. Por lo general, los vidrios son resistentes al ataque químico y se clasifican según su resistencia a la corrosión por ácidos, álcalis o agua.

8.5 Vitrocerámicos

Aunque los vidrios son amorfos, los *vitrocerámicos* tienen un alto componente cristalino en su microestructura. Los vitrocerámicos, como el *Pyroceram* (un nombre comercial), contienen grandes proporciones de varios óxidos, por lo que sus propiedades son una combinación de las propiedades de los vidrios y los cerámicos. La mayoría de los vitrocerámicos son más resistentes que el vidrio. Primero se forman los productos y luego se tratan térmicamente, con lo que se produce la **desvitrificación** (recristalización) del vidrio. Por lo general, los vitrocerámicos son de color blanco o gris.

La dureza de los vitrocerámicos varía entre aproximadamente 520 y 650 HK. Debido a su coeficiente de dilatación térmica cercano a cero, también tienen una alta resistencia al choque térmico y, gracias a la ausencia de la porosidad que normalmente se encuentra en los cerámicos convencionales, son resistentes. Las propiedades de los vitrocerámicos pueden mejorarse al modificar su composición y por medio de técnicas de tratamiento térmico. Desarrollados por primera vez en 1957, los vitrocerámicos se utilizan normalmente para utensilios de cocina, intercambiadores de calor en los motores de turbina a gas, radomos (alojamientos para antenas de radar) y componentes eléctricos y electrónicos.

8.6 Grafito

El *grafito* es una forma cristalina del carbono, tiene una *estructura en capas* con planos basales o láminas de átomos de carbono compactos (vea la figura 1.5); en consecuencia, el grafito es débil cuando se cizalla a lo largo de las capas. Esta característica, a su vez, da al grafito sus propiedades de baja fricción y explica su uso como lubricante, especialmente a temperaturas elevadas. Sin embargo, sus propiedades de fricción son bajas sólo en un ambiente de aire o humedad; al vacío, es abrasivo y por lo tanto un lubricante malo. A diferencia de otros materiales, la resistencia y rigidez del grafito aumentan con la temperatura. El grafito amorfo se conoce como **negro de humo** (hollín negro) y se utiliza como pigmento. La punta de un lápiz ordinario es una mezcla de grafito y arcilla; en un principio, se pensó que los depósitos de grafito encontrados a inicios del siglo xvi eran una forma de plomo.

Aunque es frágil, el grafito tiene alta conductividad eléctrica y térmica y buena resistencia al choque térmico y a la alta temperatura, aunque comienza a oxidarse a 500 °C (930 °F). Es un material importante para aplicaciones tales como electrodos, elementos de calefacción, escobillas para motores, accesorios y piezas de hornos de alta temperatura, materiales para molde (como crisoles para la fusión y colada de metales) y sellos (figura 8.6). Una característica del grafito es su resistencia a los productos químicos, por lo que se utiliza en filtros para fluidos corrosivos; su sección transversal de baja absorción y alta dispersión de neutrones térmicos hacen que el grafito sea adecuado también para aplicaciones nucleares.

Fibras de grafito. Un uso importante del grafito es como *fibra* en los plásticos reforzados y materiales compósitos, como se describe en la sección 9.2.

Espumas de carbono y grafito. Estas espumas tienen altas temperaturas de servicio, inertidad química, dilatación térmica baja y propiedades térmicas y eléctricas que pueden adaptarse a aplicaciones específicas. Las *espumas de carbono* están disponibles en estructuras grafíticas o no grafíticas. Las *espumas grafíticas* (por lo general producidas a partir de petróleo, alquitrán de hulla y alquitranes sintéticos) tienen baja densidad, alta conductividad térmica y eléctrica, pero menor resistencia mecánica y son mucho más caras que las espumas no grafíticas (producidas a partir de carbón o resinas orgánicas), las cuales son altamente amorfas.

Estas espumas tienen una microestructura celular, con poros interconectados, por lo tanto sus propiedades mecánicas dependen de la densidad (vea también la sección 8.3). Los bloques de espuma pueden maquinarse fácilmente en diversas formas complejas. Las aplicaciones de las espumas de carbono incluyen su uso como materiales básicos en

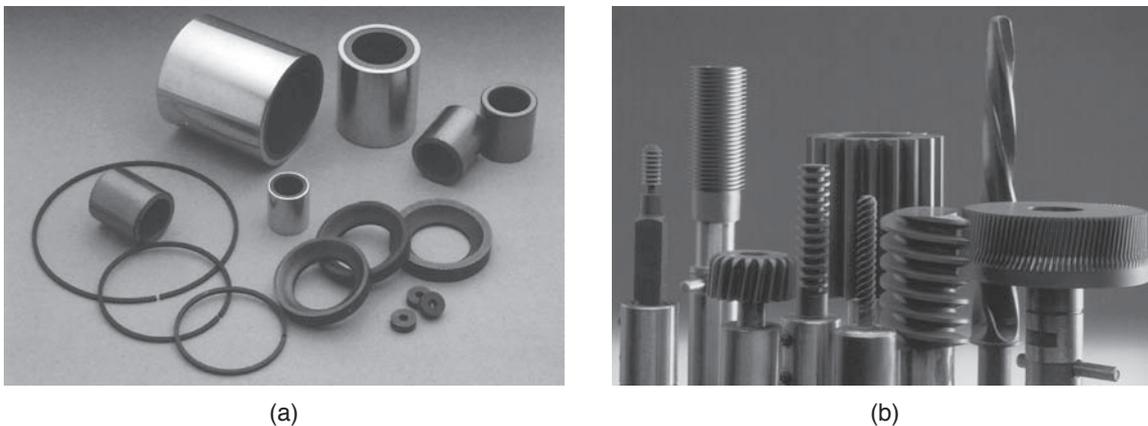


FIGURA 8.6 (a) Diversos componentes de ingeniería hechos con grafito. *Fuente:* Cortesía de Poco Graphite, Inc., una compañía de Unocal. (b) Ejemplos de electrodos de grafito utilizados para electroerosión (sección 27.5). *Fuente:* Cortesía de Unicorn, Inc.

aeronaves y paneles interiores de barcos, aislamiento estructural, paneles de absorción acústica, soportes para espejos espaciales, baterías de iones de litio y protección térmica y contra el fuego.

8.6.1 Fullerenos

Las moléculas de carbono (típicamente C₆₀) se producen ahora en la forma de balones de fútbol, son llamadas *fulerenos* o **bolas bucky** en honor a B. Fuller (1895-1983), el inventor del domo geodésico. Estas moléculas esféricas químicamente inertes se producen a partir de hollín y actúan igual que las partículas de lubricante sólido. Cuando se mezclan con metales, los fullerenos pueden llegar a ser superconductores a temperaturas bajas (alrededor de 40 K). A pesar de lo prometedores que resultan, en la actualidad no existen aplicaciones comerciales para las bolas bucky.

8.6.2 Nanotubos

Los nanotubos de carbono pueden ser vistos como formas tubulares de grafito y son de interés para el desarrollo de dispositivos a nanoescala (vea también *nanomateriales*, sección 8.8). Los *nanotubos* son producidos por ablación de grafito con láser, por descarga de arco de carbono y, más a menudo, por deposición de vapor químico (CVD, por sus siglas en inglés, sección 34.6.2). Pueden ser de una sola pared (SWNT, por sus siglas en inglés) o de pared múltiple (MWNT, por sus siglas en inglés) y pueden doparse con diversas especies.

Los nanotubos de carbono tienen una resistencia excepcional, esto los hace atractivos como fibras de refuerzo para materiales compósitos; sin embargo, debido a que tienen muy baja adherencia con la mayoría de los materiales, la delaminación con la matriz puede limitar su eficacia como refuerzo. Es difícil dispersar los nanotubos adecuadamente debido a que tienen tendencia a agruparse y eso limita su efectividad como refuerzo. Los nanotubos de carbono se han usado en algunos productos como cuadros de bicicletas, bates de béisbol especiales, palos de golf y raquetas de tenis. Los nanotubos proporcionan sólo una fracción del material de refuerzo (por volumen) y las fibras de grafito juegan el papel más importante.

Una característica adicional de los nanotubos de carbono es su muy alta capacidad de cargar corriente eléctrica. Pueden fabricarse como semiconductores o conductores, dependiendo de la orientación del grafito en el nanotubo (figura 8.7). En teoría, los nanotubos de sillón son capaces de cargar una densidad de corriente 1000 veces mayor que la cargada por la plata o el cobre, esto los hace atractivos para las conexiones eléctricas en nanodispositivos. Los nanotubos de carbono se han incorporado en polímeros para

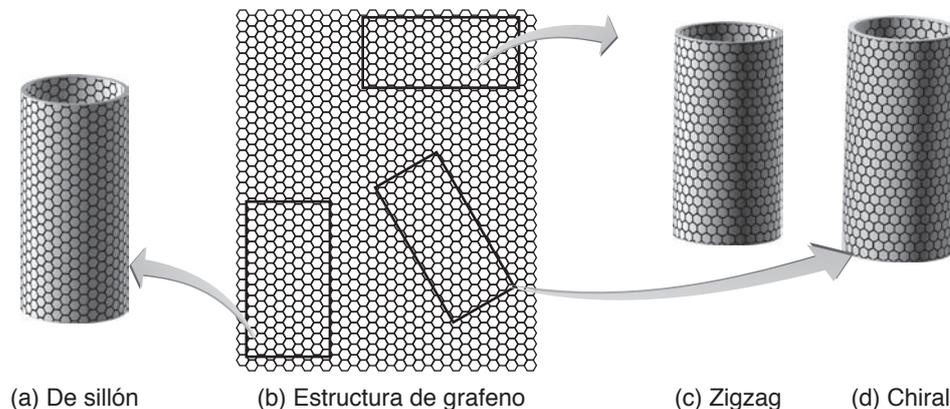


FIGURA 8.7 Formas de los nanotubos de carbono producidos a partir de una sección de grafito: de sillón, zigzag y chiral. Los nanotubos de sillón se destacan por su alta conductividad eléctrica, mientras que los nanotubos en zigzag y chirales son semiconductores.

mejorar su capacidad de descarga de electricidad estática, especialmente en las líneas de combustible para aplicaciones automotrices y aeroespaciales.*

Entre los numerosos usos propuestos para los nanotubos de carbono están el almacenamiento de hidrógeno para uso en vehículos impulsados por hidrógeno, pantallas planas, ingeniería de tejidos humanos, cables eléctricos para circuitos a nanoescala, catalizadores y generadores de microondas y de rayos X. En la actualidad, se están desarrollando sensores altamente sensibles usando nanotubos de carbono alineados para detectar gases letales, como el gas sarín.

8.6.3 Grafeno

El *grafeno* puede ser considerado como una sola hoja de grafito, o como un nanotubo sin enrollar, como se muestra en la figura 8.7b. Es uno de los materiales que se encuentra con mayor frecuencia, pero su observación directa en microscopios electrónicos de transmisión data sólo desde inicios de la década de 1960. Se ha desarrollado cierta cantidad de métodos para la producción de grafeno, incluyendo la epitaxia sobre carburo de silicio o sustratos de metal y la reducción química del grafito. El interés en la investigación del grafeno ha crecido considerablemente en los últimos años y se han sugerido aplicaciones de este material en la forma de transistores en circuitos integrados y en celdas solares.

8.7 Diamante

El *diamante* es una forma de carbono, tiene una estructura unida en forma covalente. Es la sustancia más dura conocida (de 7000 a 8000 HK); sin embargo, es frágil y comienza a descomponerse en aire aproximadamente a 700 °C (1300 °F), pero resiste temperaturas más altas en un entorno no oxidante.

El **diamante sintético** o **industrial** se fabricó por primera vez en 1955. Un método común de manufacturarlo consiste en someter el grafito a una presión hidrostática de 14 GPa (2 millones de psi) y temperatura de 3000 °C (5400 °F), es conocido como *síntesis a alta presión y alta temperatura* (HPHT, por sus siglas en inglés). Una alternativa es la producción de diamantes a través de un proceso que se llama deposición de vapor químico (CVD, sección 34.6.2), en el cual se deposita carbono sobre una semilla inicial de polvo de diamante. El procedimiento CVD se utiliza con mayor frecuencia para fabricar gemas sintéticas. El diamante sintético tiene propiedades idénticas, y a veces ligeramente superiores, que el diamante natural debido a la presencia de una menor cantidad de impurezas más pequeñas. Las gemas tienen un tinte característico de color naranja o amarillo debido a las impurezas, resultantes del proceso CVD, mientras que el tratamiento con láser del diamante puede cambiar el tinte a un color rosa o azul. Sin embargo, como la mayor parte del costo de una piedra preciosa se atribuye al tallado y pulido (capítulo 26) para lograr una forma deseada, los diamantes sintéticos sólo son ligeramente menos costosos que los naturales.

El diamante sintético está disponible en una variedad de tamaños y formas; para usarlo en el maquinado abrasivo, el tamaño de grano más común tiene 0.01 mm (0.0004 pulg) de diámetro. Las partículas de diamante pueden recubrirse con níquel, cobre o titanio para mejorar su desempeño en las operaciones de rectificado. También se ha desarrollado el **carbono tipo diamante** y se utiliza como un recubrimiento de película de diamante, como se describe en la sección 34.13.

Además de su uso en joyería, los diamantes sintéticos de calidad gema tienen aplicaciones como disipadores de calor en computadoras, en las telecomunicaciones y en la industria de los circuitos integrados, así como en los láseres de alta potencia. Su conductividad eléctrica es 50 veces mayor que la del diamante natural y es 10 veces más resistente a los daños por láser.

* (Nota del revisor técnico). [armchair nanotubes: nanotubos de sillón; son definidos por diversos autores en función de la dirección que indican (la dirección del nanotubo que es paralela a la malla desenrollada). Al parecer, si el vector que une ambos lados cortados de la malla yace sobre el vector que define el lado del hexágono, entonces es un nanotubo de sillón. Si es perpendicular es quiral y si forma un ángulo es en zigzag (vea la figura 8.7).

Debido a sus características favorables, el diamante tiene numerosas aplicaciones importantes como:

- Materiales para herramientas de corte, como un monocristal o en forma policristalina.
- Abrasivos en piedras de esmeril para materiales duros.
- Rectificado de piedras de esmeril (por ejemplo, para el afilado de los granos abrasivos).
- Insertos para dados de trefilado en la elaboración de alambres con diámetros menores a 0.06 mm (0.0025 pulg).
- Revestimientos para herramientas de corte y dados.

8.8 Nanomateriales

En la actualidad, siguen teniendo lugar desarrollos importantes en la producción de materiales en forma de partículas, fibras, alambres, tubos, películas y compósitos, con tamaños que suelen estar entre 1 nm y 100 nm. Los materiales *nanocristalinos* o de *nanofase*, investigados por primera vez a principios de la década de 1980 y llamados generalmente *nanomateriales* o *nanoestructurados*, tienen ciertas propiedades que con frecuencia son superiores a las de los materiales tradicionales. Estas características incluyen alta resistencia, dureza, tenacidad, ductilidad, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión, también son adecuados para aplicaciones estructurales (soporte de carga) y no estructurales en combinación con singulares propiedades eléctricas, magnéticas, térmicas y ópticas.

La composición de un nanomaterial puede ser cualquier combinación de elementos químicos; entre las composiciones más importantes están los carburos, óxidos, nitruros, metales y sus aleaciones, polímeros orgánicos, semiconductores y diversos compósitos. Los *nanomateriales híbridos de nanometal y polímero* se desarrollaron para componentes muy ligeros. Investigaciones más recientes incluyen el desarrollo de *nanopapel*, con muy alta resistencia y dureza, producido a partir de pulpa de madera con fibras reorganizadas en una enmarañada malla porosa.

Los métodos de producción para los nanomateriales incluyen la condensación en gas inerte, pulverización catódica, síntesis de plasma, posición de electrodo, síntesis de sol-geles y aleación mecánica o en molino de bolas. Los polvos sintetizados se consolidan en materiales volumétricos mediante diversas técnicas, incluyendo la compactación y sinterización. Las nanopartículas tienen una relación de área superficial sobre volumen muy alta, lo que afecta su comportamiento en procesos tales como la difusión y la aglomeración. Debido a que la síntesis de los nanomateriales se encuentra en niveles atómicos, su pureza es del orden del 99.9999% y su homogeneidad y la uniformidad de su microestructura están altamente controladas. Como resultado, sus propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas, ópticas y químicas también pueden ser controladas con precisión. La producción y el procesamiento en productos de los nanomateriales son muy caros, por ello su efectividad de costos está en continuo estudio.

Aplicaciones de los nanomateriales. Las propiedades únicas de los nanomateriales permiten la fabricación de productos resistentes y ligeros. Los siguientes son algunos usos actuales y potenciales de los nanomateriales:

1. Herramientas e insertos de corte hechos a partir de carburos nanocristalinos y otros cerámicos.
2. Cerámicos de nanofase dúctiles y maquinables.
3. Marcos especiales para bicicletas, bates de béisbol y raquetas de tenis utilizando nanotubos de carbono (vea también la sección 8.6.2).
4. Chips de computadoras de última generación utilizando materias primas nanocristalinas de muy alta pureza, mejor conductividad térmica e interconexiones más durables.

5. Monitores de pantalla plana para computadoras portátiles y televisores, hechos mediante la síntesis de fósforo nanocristalino para mejorar la resolución de la pantalla.
6. Electrodo de bujía, equipos de encendido y combustible para cohetes, implantes médicos, detectores de alta sensibilidad, catalizadores para eliminación de contaminantes, imanes de alta potencia y baterías con alta densidad de energía.
7. Interruptores, válvulas, motores y bombas.
8. Los recubrimientos hechos de nanomateriales están bajo investigación para mejorar su resistencia al desgaste, a la abrasión y a la corrosión, así como su aislamiento térmico; también los materiales nanocristalinos y materiales de nanofase debido a su menor conductividad térmica.

Peligros para la salud. Las nanopartículas pueden representar diversos riesgos para la salud en virtud de su tamaño muy pequeño y su posible absorción a través de la piel, los pulmones o el tracto digestivo; también pueden penetrar las células humanas. Asimismo, hay una creciente evidencia de que las nanopartículas pueden contaminar el aire, agua y suelo. En consecuencia, ha aumentado la investigación sobre los riesgos de las nanopartículas para los seres humanos y el medio ambiente.

RESUMEN

- Los cerámicos, los vidrios y las diversas formas de carbono tienen gran importancia en las aplicaciones de ingeniería y en los procesos de manufactura. Los cerámicos, que son compuestos de elementos metálicos y no metálicos, generalmente se caracterizan por una alta dureza, alta resistencia a la compresión, alto módulo elástico, baja dilatación térmica, alta resistencia a la temperatura, buena inerteidad química, baja densidad y baja conductividad térmica y eléctrica. Además, son frágiles y tienen baja resistencia.
- Por lo general, los cerámicos se clasifican ya sea como tradicionales o como industriales (o de alta tecnología); estos últimos son particularmente atractivos para aplicaciones tales como componentes de motor, herramientas de corte y dispositivos que requieren resistencia contra el desgaste y la corrosión. Los cerámicos de importancia en el diseño y la manufactura son los cerámicos de óxido (alúmina y zirconia), los carburos de tungsteno y silicio los nitruros y cermets.
- Los vidrios son líquidos subenfriados y están disponibles en una amplia variedad de composiciones y propiedades mecánicas, físicas y ópticas. Los vitrocerámicos tienen una estructura predominantemente cristalina y poseen propiedades más deseables que las de los vidrios.
- El vidrio en forma volumétrica tiene una resistencia relativamente baja, pero puede reforzarse mediante tratamientos térmicos y químicos. Las fibras de vidrio se utilizan ampliamente como refuerzo en materiales compósitos.
- El grafito, los fullerenos, los nanotubos de carbono y el diamante son formas de carbono que presentan una combinación única de propiedades. El grafito tiene usos a altas temperaturas y aplicaciones eléctricas; las fibras de grafito se utilizan para reforzar plásticos y otros materiales compósitos.
- El diamante se utiliza en herramientas de corte para operaciones de maquinado de precisión, en dados para el trefilado de alambre fino y como abrasivos en los esmeriles. El carbono tipo diamante tiene aplicaciones como material de recubrimiento para mejorar la resistencia al desgaste.
- Los nanomateriales tienen propiedades físicas, mecánicas, ópticas, químicas y térmicas con diversas aplicaciones únicas. Los nanotubos de carbono representan un tema de investigación de interés continuo, sobre todo debido a sus aplicaciones en los sistemas eléctricos y electromecánicos a nanoescala.

TÉRMINOS CLAVE

Alúmina	Cerámicos de óxido	Formador de vidrio	Porosidad
Arcilla	Cerámicos industriales	Fulerenos	Sialón
Biocerámicos	Cermets	Grafeno	Sílice
Bolas bucky	Desvitrificación	Grafito	Vidrio
Carbono	Diamante	Nanocerámicos	Vitrocerámicos
Carbono tipo diamante	Diamante industrial	Nanotubos	Zirconia
Carburos	Espuma de carbono	Nanotubos de carbono	Zirconia endurecida por transformación
Cerámicos	Fatiga estática	Nitruros	Zirconia parcialmente estabilizada
Cerámicos blancos	Feldespatos	Pedernal	
Cerámicos de nanofase	Fibras de vidrio	Porcelana	

BIBLIOGRAFÍA

- Bansal, N. P. (ed.), *Handbook of Ceramic Composites*, Springer, 2005.
- Barsoum, M. W., *Fundamentals of Ceramics*, Institute of Physics Publishing, 2003.
- Bhushan, B. (ed.), *Springer Handbook of Nanotechnology*, 3a. ed., Springer, 2010.
- Buchanon, R. C. (ed.), *Ceramic Materials for Electronics: Processing, Properties and Applications*, 3a. ed., Dekker, 2004.
- Carter, C. B. y Norton, M. G., *Ceramic Materials: Science and Engineering*, Springer, 2008.
- Edinsinghe, M. J., *An Introduction to Structural Engineering Ceramics*, Ashgate Pub. Co., 1997.
- Gogotsi, Y., *Nanomaterials Handbook*, CRC Press, 2006.
- Green, D. J., *An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics*, Cambridge University Press, 1998.
- Harper, C. A. (ed.), *Handbook of Ceramics, Glasses, and Diamonds*, McGraw-Hill, 2001.
- Holand, W. y Beall, G. H., *Design and Properties of Glass Ceramics*, 2a. ed., Wiley-American Chemical Society, 2012.
- Mitura, S., *Nanomaterials*, Elsevier, 2000.
- O'Connell, M. J. (ed.), *Carbon Nanotubes: Properties and Applications*, CRC Press, 2006.
- Parinov, I., *Microstructure and Properties of High Temperature Superconductors*, Springer, 2008.
- Park, J., *Bioceramics: Properties, Characterization and Applications*, Springer, 2008.
- Prelas, M. A., Popovichi, G. y Bigelow, L. K. (eds.), *Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films*, Marcel Dekker, 1998.
- Rice, R. W., *Porosity of Ceramics*, CRC Press, 1998.
- Richerson, D. W., *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design*, 3a. ed., Marcel Dekker, 2005.
- Shelby J. E., *Introduction to Glass Science and Technology*, Royal Society of Chemistry, 2005.
- Somiya, S., Aldiner, F., Spriggs, R., Uchino, K., Kuomoto, K. y Kaneno, M. (eds.), *Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing and Properties*, Academic Press, 2003.
- Vollath, D., *Nanomaterials: An Introduction to Synthesis, Properties and Applications*, Wiley, 2008.
- Wachtman, J. B., Cannon, W. R., Matthewson, M. J., *Mechanical Properties of Ceramics*, Wiley, 2009.

PREGUNTAS DE REPASO

- 8.1** ¿Qué es un cerámico?
- 8.2** Liste las principales diferencias entre las propiedades de los cerámicos y las de los metales y plásticos.
- 8.3** Liste los principales tipos de cerámicos que son útiles en aplicaciones de ingeniería.
- 8.4** ¿En qué consisten normalmente los siguientes materiales? (a) Carburos, (b) cermets y (c) sialón.
- 8.5** ¿Qué es la porcelana?
- 8.6** ¿Qué es el vidrio? ¿Por qué se le denomina material subenfriado?
- 8.7** ¿En qué se diferencia un vidrio de un vitrocerámico?
- 8.8** ¿Qué es la desvitrificación?
- 8.9** Liste los principales tipos de vidrios y sus aplicaciones.
- 8.10** ¿Qué es la fatiga estática? ¿Cuál es su importancia?
- 8.11** Describa los principales usos del grafito.
- 8.12** ¿Cómo se producen los cerámicos de alúmina?
- 8.13** ¿Qué características de la zirconia parcialmente estabilizada la distinguen de otros cerámicos?
- 8.14** ¿Qué son las bolas bucky?
- 8.15** Liste los principales usos de los diamantes.
- 8.16** ¿Qué es un nanotubo de carbono? Explique por qué no son tan comunes como otras formas de carbono.
- 8.17** ¿Qué es el grafeno? ¿Cómo se relaciona con el grafito?
- 8.18** ¿Qué tienen en común los términos nanotubos de carbono de "sillón", "zigzag" y "chiral"?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 8.19** Explique por qué los cerámicos son más débiles en tensión que en compresión.
- 8.20** ¿Cuáles son las ventajas de los cermetes? Sugiera algunas aplicaciones aparte de las dadas en el presente capítulo.
- 8.21** Explique por qué la conductividad eléctrica y térmica de los cerámicos disminuye con el aumento de la porosidad.
- 8.22** Explique por qué los datos de las propiedades mecánicas indicadas en la tabla 8.2 tienen un rango tan amplio. ¿Cuál es la importancia de esto en la práctica de la ingeniería?
- 8.23** Describa las razones que han impulsado el desarrollo del diamante sintético.
- 8.24** Explique por qué las propiedades mecánicas de los cerámicos generalmente difieren de las de los metales.
- 8.25** Explique la forma en que los cerámicos pueden hacerse más tenaces.
- 8.26** Liste y describa situaciones en las que la fatiga estática puede ser importante.
- 8.27** ¿Qué propiedades son importantes en la fabricación de cerámicos resistentes al calor para su uso en altos hornos? ¿Por qué?
- 8.28** En la actualidad, existe una gran variedad de vidrios disponibles. ¿Por qué es así?
- 8.29** ¿Cuál es la diferencia entre la estructura del grafito y la del diamante? ¿Es importante? Explique su respuesta.
- 8.30** Liste y explique los materiales que son adecuados para su uso en tazas para café.
- 8.31** El óxido de aluminio y la zirconia parcialmente estabilizada se describen como blancos en apariencia. ¿Pueden ser de color? Si es así, ¿cómo se logra esto?
- 8.32** ¿Por qué la resistencia de una pieza cerámica depende de su tamaño?
- 8.33** En los viejos castillos y en las iglesias de Europa, los ventanales muestran ondulaciones pronunciadas y son más gruesas en la parte inferior que en la superior. Explique esta característica.
- 8.34** ¿Un carburo es ejemplo de un material compuesto? Explique su respuesta.
- 8.35** Los cerámicos son duros y resistentes tanto en compresión como en cortante. ¿Por qué, entonces, no se usan en clavos u otros sujetadores? Explique.
- 8.36** Realice una búsqueda en internet y determine la composición química del vidrio utilizado para (a) líneas de comunicación de fibra óptica, (b) vajillas de cristal y (c) fibras de vidrio de alta resistencia.
- 8.37** Investigue y liste los cerámicos utilizados en aplicaciones de superconductores a altas temperaturas.
- 8.38** Explique por qué las gemas de diamante sintético no son significativamente más baratas que las gemas de diamante natural.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

- 8.39** En un cerámico completamente denso, $UTS_o = 200$ MPa y $E_o = 330$ GPa. ¿Qué valores tienen estas propiedades con 15% de porosidad y $n = 4, 5, 6$ y 7 , respectivamente?
- 8.40** Grafique los valores de UTS , E y k de los cerámicos como una función de la porosidad P . Describa y explique las tendencias que se observan en su comportamiento.
- 8.41** ¿Cuál sería la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad del cerámico del problema 8.39 con porosidades de 25% y 50% y los cuatro valores de n dados?
- 8.42** Calcule las conductividades térmicas de cerámicos con porosidades de 10, 20 y 40% para $k_o = 0.7$ W/mK.
- 8.43** Un cerámico tiene $k_o = 0.80$ W/mK. Si este cerámico se forma como un cilindro con una distribución de la porosidad dada por $P = 0.1(x/L)(1 - x/L)$, donde x es la distancia desde un extremo del cilindro y L es la longitud total del cilindro, grafique la porosidad como una función de la distancia, evalúe la porosidad media y calcule la conductividad térmica promedio.
- 8.44** Es posible demostrar que el peso mínimo de una columna que soportará una carga dada depende de la relación de la rigidez del material sobre la raíz cuadrada de su densidad. Grafique esta propiedad para un cerámico como una función de la porosidad.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

- 8.45** Haga una lista de las piezas cerámicas que pueda encontrar alrededor de su casa o en su automóvil. Dé razones por las cuales las piezas están hechas de cerámicos.
- 8.46** Suponga que usted trabaja en ventas técnicas y está completamente familiarizado con todas las ventajas y limitaciones de los cerámicos. ¿Cuál de los mercados tradicionalmente ocupados por materiales no cerámicos cree que pueden penetrar los cerámicos? ¿De qué le gustaría hablar con sus clientes potenciales durante sus visitas de ventas? ¿Qué preguntas piensa usted que podrían hacerle acerca de los cerámicos?
- 8.47** Describa aplicaciones en las que sería deseable usar un material cerámico con un coeficiente de dilatación térmica cercano a cero.
- 8.48** Por lo general, el módulo de elasticidad de los cerámicos se mantiene a temperaturas elevadas. ¿Qué aplicaciones de ingeniería podrían beneficiarse de esta característica?
- 8.49** Liste y analice los factores que se tendrían en cuenta al sustituir un componente metálico por un componente cerámico en un producto específico.

8.50 Obenga algunos datos a partir de la literatura especializada que se incluye en la bibliografía de este capítulo y demuestre cuantitativamente los efectos de la temperatura sobre la resistencia y el módulo de elasticidad de varios cerámicos. Comente sobre cómo se distingue la forma de esas curvas de las curvas correspondientes para los metales.

8.51 Realice una búsqueda en la literatura pertinente y escriba un breve documento que resuma las propiedades y posibles aplicaciones del grafeno.

8.52 En la sección 8.4.1 señalamos que hay varios tipos básicos de vidrios disponibles. Realice un estudio en la literatura técnica y prepare una tabla con estos vidrios indicando diversas propiedades mecánicas, físicas y ópticas.

8.53 En la actualidad, se está considerando el uso de pistones cerámicos en motores de combustión de alta velocidad. Liste las ventajas e inquietudes que usted tenga con respecto a esta aplicación.

8.54 Se ha observado que la resistencia de los materiales frágiles (como cerámicos y vidrios) es muy sensible a los defectos superficiales, como rayaduras (esto se conoce como *sensibilidad a la muesca*). Consiga varias piezas de estos materiales, ráyelas y pruébelas sujetándolas cuidadosamente en un tornillo de banco y doblándolas. Comente sobre sus observaciones.

8.55 Por lo general, los calentadores eléctricos para uso doméstico utilizan un filamento cerámico como elemento de calentamiento. Liste las propiedades requeridas para este filamento, explique por qué un cerámico es un material adecuado y realice una búsqueda en internet para determinar el material cerámico específico que se utiliza realmente en esta aplicación.

Materiales compósitos: estructura, propiedades generales y aplicaciones

CAPÍTULO



- Considerando lo atractivo de sus propiedades, en especial sus altas relaciones de resistencia a peso y de rigidez a peso, los compósitos están entre los materiales de ingeniería más importantes.
- Los materiales compósitos se usan ampliamente como componentes estructurales, sobre todo en la industria aeroespacial donde el ahorro en peso es una consideración importante.
- En este capítulo se describen los principales tipos de materiales compósitos, las características de las fibras de refuerzo comúnmente usadas y su efecto en la mejora de las propiedades mecánicas.
- Después se describe el papel de la matriz y se examinan las tres clases principales de materiales para matriz (plástico, metal y cerámico) existentes.
- El capítulo concluye con un análisis de la selección y las aplicaciones de una variedad de plásticos reforzados y compósitos.

9.1 Introducción

Un **material compósito** es una combinación de dos o más fases químicamente distintas e insolubles con una interfase reconocible, de modo que sus propiedades y rendimiento estructural son superiores a las de los componentes actuando en forma independiente. Estas combinaciones se conocen como compósitos de **matriz polimérica**, de **matriz metálica** y de **matriz cerámica**. Tal como se muestra en la tabla 7.1, los refuerzos de fibra mejoran significativamente la resistencia mecánica, la rigidez y la resistencia a la termofluencia de los plásticos, en particular sus relaciones de resistencia a peso y de rigidez a peso. Los materiales compósitos han encontrado aplicaciones cada vez más amplias en aeronaves (figura 9.1), vehículos espaciales, satélites, estructuras costeras, tuberías, electrónicos, automóviles, barcos y artículos deportivos.

El ejemplo más antiguo de los materiales compósitos, que se remonta al año 4000 a. C., es la adición de paja a la arcilla para hacer ladrillos más resistentes. En esta combinación, la paja representa las fibras de refuerzo y la arcilla es la matriz. Otro ejemplo de material compósito es el concreto reforzado que se desarrolló en la década de 1800. Por sí mismo, el concreto es frágil y tiene poca o ninguna resistencia a la tensión; las varillas de acero para refuerzo (*barras de refuerzo*) imparten la resistencia a la tensión necesaria para el concreto.

Los compósitos, en un sentido general, pueden incluir una amplia variedad de materiales: cermets (sección 8.2.3), aleaciones de dos fases (sección 4.2), materiales naturales como la madera y el hueso y materiales reforzados o combinados como los neumáticos de automóvil reforzados con alambre de acero. En este capítulo se describe la estructura,

- 9.1 Introducción 215
- 9.2 Estructura de los plásticos reforzados 216
- 9.3 Propiedades de los plásticos reforzados 221
- 9.4 Aplicaciones de los plásticos reforzados 224
- 9.5 Compósitos de matriz metálica 226
- 9.6 Compósitos de matriz cerámica 228
- 9.7 Otros compósitos 229

EJEMPLO:

- 9.1 Cálculo de la rigidez de un material compósito y de la carga soportada por las fibras 224

CASOS DE ESTUDIO:

- 9.1 Cascos militares y chalecos antibalas hechos de materiales compósitos 225
- 9.2 Mordazas de frenos de material compósito con matriz de aluminio 227
- 9.3 Compósitos en la industria aeronáutica 229

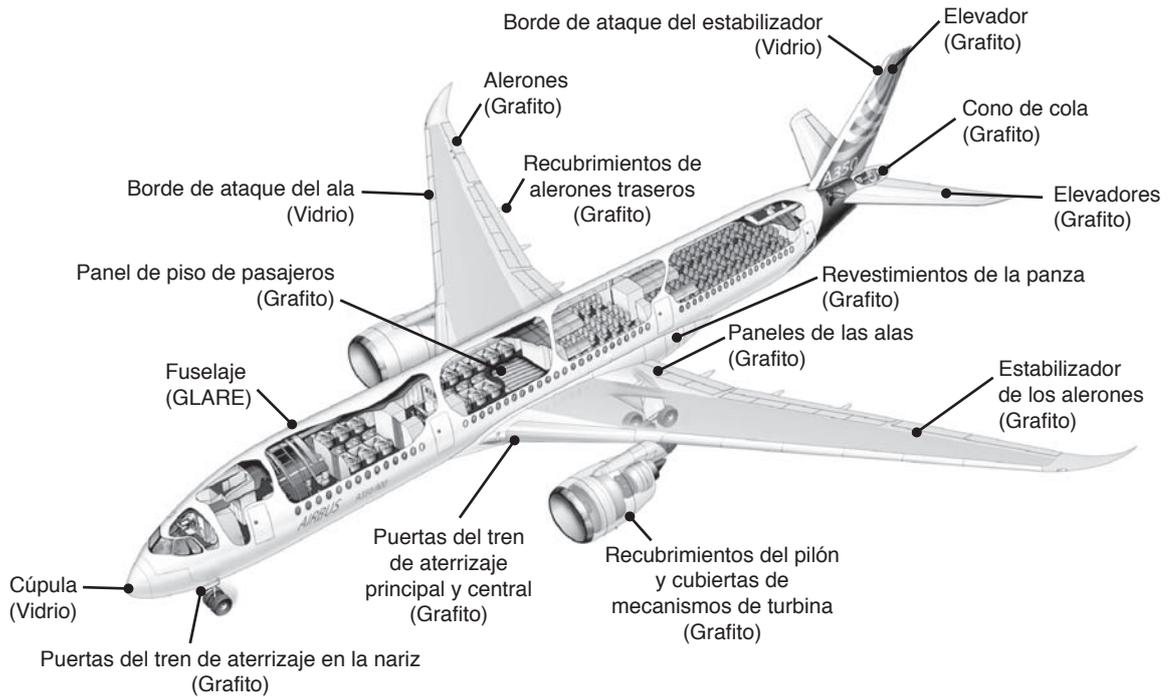


FIGURA 9.1 Aplicación de materiales compósitos avanzados en el Airbus 350. Se muestra el tipo de refuerzo, con el fuselaje hecho de GLARE (un laminado de polímero y aluminio reforzado con vidrio). *Fuente:* Reutilización cortesía de Flight Global, <http://www.flightglobal.com/news/articles/paris-air-show-a350-xwb-ready-to-rock-327500/>.

las propiedades y las aplicaciones de los materiales compósitos, la transformación y conformación de estos materiales se describen en el capítulo 19.

9.2 Estructura de los plásticos reforzados

Los **plásticos reforzados**, también conocidos como **compósitos de matriz polimérica** (PMC, por sus siglas en inglés) y los **plásticos reforzados con fibra** (FRP, por sus siglas en inglés), consisten en **fibras** (la fase discontinua o dispersa) integradas a una **matriz** de polímero (la fase continua), como se muestra en la figura 9.2. Estas fibras son resistentes y rígidas (tabla 9.1), tienen alta resistencia específica (relación de resistencia a peso) y alta rigidez específica (relación de rigidez a peso); vea la figura 9.3. Además, las estructuras de plástico reforzado han mejorado su resistencia a la fatiga y tienen mayor tenacidad y resistencia a la termofluencia que las hechas de plásticos no reforzados.

En los plásticos reforzados, las fibras por sí mismas tienen poco valor estructural; son rígidas en su dirección longitudinal pero no tienen rigidez o resistencia transversal. Aunque la matriz polimérica sea menos resistente y menos rígida que las fibras, es más tenaz y a menudo más inerte desde el punto de vista químico; por ello, los plásticos reforzados combinan las ventajas de cada uno de los dos componentes. Por lo general, el porcentaje de fibras (en volumen) agregado a los plásticos reforzados oscila entre 10 y 60 por ciento.

9.2.1 Fibras de refuerzo

El vidrio, el carbono, los cerámicos, las aramidas y el boro son las fibras de refuerzo más comunes para los PMC (tabla 9.2).

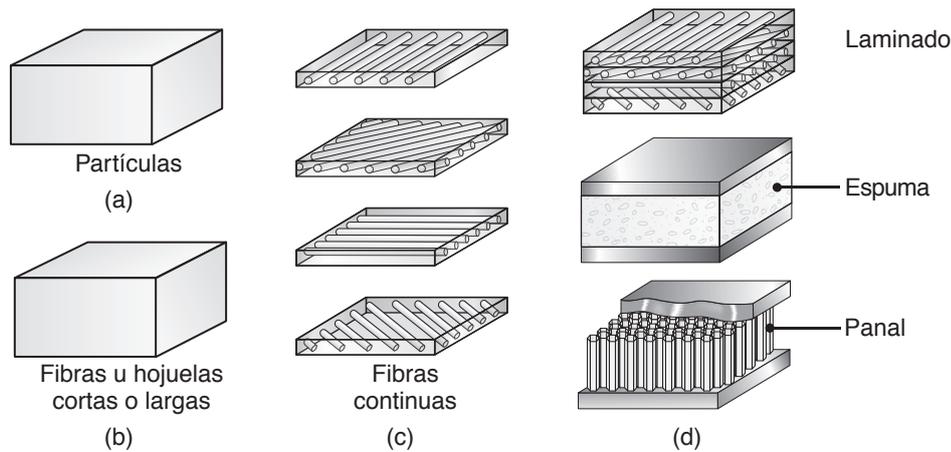


FIGURA 9.2 Ilustración esquemática de los métodos de refuerzo utilizados para plásticos (matriz) con (a) partículas, (b) fibras u hojuelas cortas o largas y (c) fibras continuas. Las estructuras laminadas que se muestran en (d) pueden producirse a partir de capas de fibras continuas o estructuras en forma de sándwich utilizando una espuma o núcleo en panal (vea también la figura 16.58).

TABLA 9.1

Tipos y características generales de los materiales compósitos	
Material	Características
Fibras	
Vidrio	Alta resistencia, baja rigidez, alta densidad; tiene el costo más bajo; los tipos E (aluminoborosilicato de calcio) y S (aluminosilicato de magnesita) son los utilizados comúnmente.
Carbono	Disponible con alto módulo o alta resistencia; bajo costo; menos denso que el vidrio; en ocasiones se usa en combinación con nanotubos de carbono (vea la sección 8.6.2).
Boro	Alta resistencia y rigidez; tiene la densidad más alta; el costo más alto; tiene un filamento de tungsteno como su centro.
Aramidas (Kevlar)	Tienen la más alta relación de resistencia a peso entre las fibras; alto costo.
Otras fibras	Nailon, carburo de silicio, nitruro de silicio, óxido de aluminio, carburo de boro, nitruro de boro, carburo de tantalio, acero, tungsteno, molibdeno.
Materiales de la matriz	
Termofijos	Epoxi y poliéster, siendo este último el que se utiliza con mayor frecuencia; otros son los fenólicos, fluorocarbonos, la polietersulfona, el silicio y las poliimididas.
Termoplásticos	Polieterecetona; son más tenaces que los termofijos pero menos resistentes a la temperatura.
Metales	Aluminio, aluminio-litio, magnesio y titanio; las fibras son de carbono, óxido de aluminio, carburo de silicio y boro.
Cerámicos	Carburo de silicio, nitruro de silicio, óxido de aluminio y mulita; las fibras son de diferentes cerámicos.

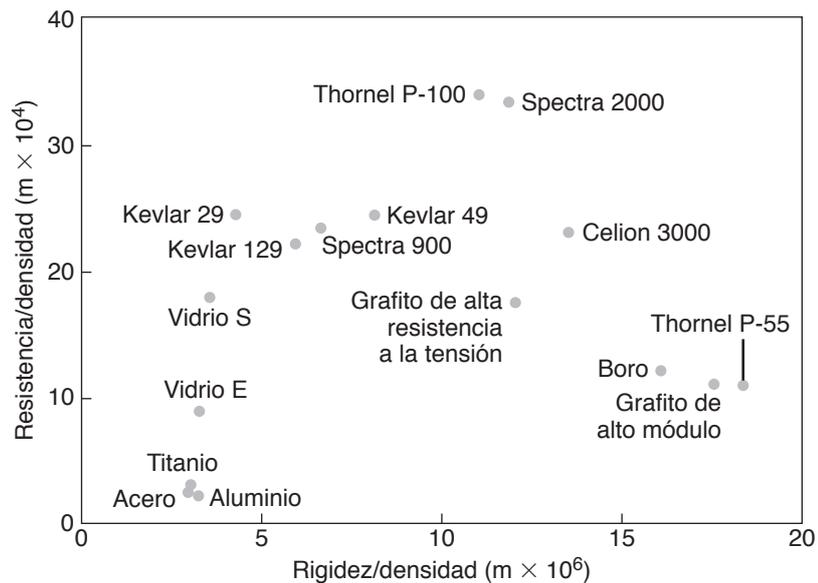


FIGURA 9.3 Resistencia a la tensión específica (relación de resistencia a la tensión sobre la densidad) y módulo de tensión específico (relación del módulo de elasticidad sobre la densidad) para diversas fibras usadas en plásticos reforzados; observe el amplio rango disponible para la resistencia y la rigidez específicas.

TABLA 9.2

Propiedades típicas de las fibras de refuerzo

Tipo	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Densidad (kg/m^3)	Costo relativo
Boro	3500	380	2380	El más alto
Carbono				
De alta resistencia	3000	275	1900	Bajo
De alto módulo	2000	415	1900	Bajo
Vidrio				
Tipo E	3500	73	2480	El más bajo
Tipo S	4600	85	2540	El más bajo
Kevlar				
29	2920	70.5	1440	Alto
49	3000	112.4	1440	Alto
129	3200	85	1440	Alto
Nextel				
312	1700	150	2700	Alto
610	2770	328	3960	Alto
Spectra				
900	2270	64	970	Alto
1000	2670	90	970	Alto
2000	3240	115	970	Alto
Alúmina (Al_2O_3)	1900	380	3900	Alto
Carburo de silicio	3500	400	3200	Alto

Nota: estas propiedades varían significativamente según el material y el método de preparación.

Fibras de vidrio. Las fibras de vidrio son las más utilizadas y menos costosas de todas las fibras. El material compuesto se denomina **plástico reforzado con fibra de vidrio** (GFRP, por sus siglas en inglés) y puede contener entre 30 y 60% de fibras de vidrio. Las fibras se hacen mediante estirado del vidrio fundido a través de pequeñas aberturas de un dado de platino (vea la sección 18.3.4), después se alargan, enfrían y enrollan. Las fibras de vidrio son tratadas de manera adicional con silano (un hidruro de silicio), como se describe en la sección 9.3. Los principales tipos de fibra de vidrio son:

- **Tipo E:** vidrio de aluminoborosilicato de calcio, el que se utiliza con más frecuencia.
- **Tipo S:** vidrio de aluminosilicato de magnesia que ofrece mayor resistencia y rigidez, pero a un mayor costo.
- **Tipo E-CR:** fibra de vidrio de alto rendimiento, tiene mayor resistencia a las temperaturas elevadas y a la corrosión por ácido que el vidrio E.

Fibras de carbono. Las fibras de carbono (figura 9.4a), aunque son más caras que las fibras de vidrio, tienen una combinación de baja densidad, alta resistencia y alta rigidez. El material compuesto se llama **plástico reforzado con fibra de carbono** (CFRP, por sus siglas en inglés). Aunque las palabras suelen usarse de manera intercambiable, la diferencia entre el *carbono* y el *grafito* depende de la pureza del material y de la temperatura a la que se procesó. Las fibras de carbono son de, al menos, 90% de carbono; por lo general, las fibras de grafito tienen más de 99% de carbono. Una fibra de carbono típica contiene carbono amorfo (no cristalino) y grafito (carbono cristalino). Estas fibras se clasifican según su módulo de elasticidad, que va de 35 a 800 GPa, como de *módulo bajo*, *intermedio*, *alto* y *muy alto*. Algunos nombres comerciales de las fibras de carbono son Celion y Thornel (vea la figura 9.3). Los nanotubos de carbono también se han utilizado como refuerzo en materiales compósitos, como se describe en la sección 8.6.2.

Todas las fibras de carbono están hechas por **pirólisis** de precursores **orgánicos**, comúnmente *poliacrilonitrilo* (PAN) debido a su bajo costo. También pueden utilizarse como precursores *rayón* y *alquitrán* (el residuo de la descomposición catalítica en la refinación del petróleo). La pirólisis es el proceso de inducir cambios químicos mediante calor —por ejemplo, al quemar un tramo de tejido y hacer que el material se carbonice y adquiera el color negro—. Con PAN, las fibras tienen enlaces cruzados en forma parcial a una temperatura moderada (con el fin de evitar la fusión durante los pasos posteriores del procesamiento) y se alargan de manera simultánea. En esta etapa, las fibras se *carburizan*; es decir, se exponen a temperaturas elevadas para expulsar el hidrógeno (deshidrogenación) y el nitrógeno (desnitrógenación) del PAN. Las temperaturas de carbonización llegan aproximadamente hasta 1500 °C (2730 °F); para la grafitización, hasta 3000 °C (5400 °F).

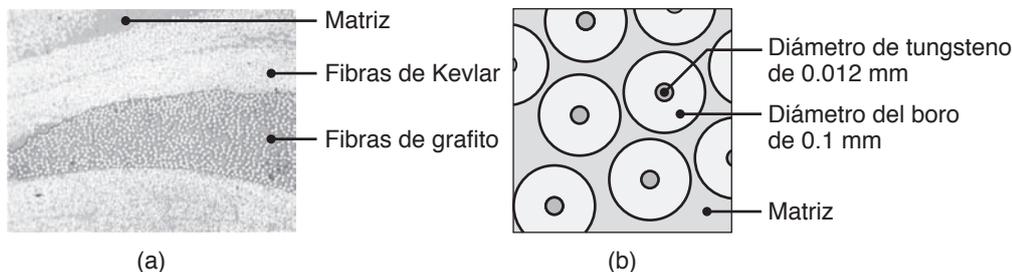


FIGURA 9.4 (a) Sección transversal de una raqueta de tenis, mostrando las fibras de refuerzo de grafito y aramida (Kevlar). *Fuente:* Cortesía de F. Garrett, Wilson Sporting Goods Co. (b) Sección transversal de un material compuesto reforzado con fibra de boro.

Fibras de grafito conductoras. Estas fibras se producen para que sea posible mejorar la conductividad eléctrica y térmica de los componentes de plástico reforzado. Las fibras se recubren con un metal (generalmente níquel), utilizando un proceso de electrodeposición continua. Por lo general, el recubrimiento es de $0.5 \mu\text{m}$ de espesor sobre un núcleo de fibra de grafito con diámetro de $7 \mu\text{m}$. Están disponibles en forma corta o en forma continua, las fibras conductoras se incorporan directamente en las piezas de plástico moldeadas por inyección (sección 19.3). Las aplicaciones incluyen blindaje electromagnético y de radiofrecuencia y protección contra rayos.

Fibras cerámicas. Las fibras cerámicas son ventajosas para aplicaciones a altas temperaturas y en materiales compósitos de matriz metálica (sección 9.5). Estas fibras tienen baja elongación, baja conductividad térmica y buena resistencia química, además de ser adecuadas para aplicaciones a temperaturas elevadas. Una de las familias de fibras cerámicas es *Nextel*, un nombre comercial; las fibras tienen forma ovalada en su sección transversal y consisten en alúmina, sílice y óxido bórico. Las propiedades mecánicas típicas de los cerámicos se proporcionan en la tabla 9.2.

Fibras poliméricas. Las fibras poliméricas pueden estar hechas de aramidas, nailon, rayón o acrílicos; las más comunes son las **fibras de aramida**. Las aramidas (sección 7.6), como el *Kevlar*, se encuentran entre las fibras más resistentes con muy alta resistencia específica (figura 9.3). Las aramidas pueden someterse a cierta deformación plástica antes de la fractura y, por lo tanto, tienen mayor tenacidad que las fibras frágiles. Sin embargo, absorben humedad (son *higroscópicas*) y con ello sus propiedades se degradan.

Una fibra de polietileno de alto rendimiento es la llamada *Spectra* (nombre comercial); tiene un peso molecular ultra-alto y alta orientación de la cadena molecular. *Spectra*, de color blanco brillante, tiene mejor resistencia a la abrasión y resistencia a la fatiga por flexión que las fibras de aramida, a un costo similar. Además, debido a su menor densidad (970 kg/m^3), tiene mayores resistencia y rigidez específicas que las fibras de aramida (vea la tabla 9.2). Por otra parte, sus principales limitaciones son bajo punto de fusión y malas características de adhesión, en comparación con otros polímeros. (La fabricación de fibras poliméricas se describe en la sección 19.2.2).

Fibras de boro. Estas fibras consisten en fibras de tungsteno con una capa de boro que se integra mediante técnicas de deposición química al vapor (figura 9.4b); el boro también puede depositarse sobre fibras de carbono. Las fibras de boro tienen propiedades deseables como alta resistencia y rigidez, tanto en tensión como en compresión, y resistencia a las altas temperaturas. Sin embargo, debido a la alta densidad del tungsteno, estas fibras son pesadas y caras.

Otras fibras. Entre las distintas fibras utilizadas en los materiales compósitos están el carburo de silicio, nitruro de silicio, óxido de aluminio, zafiro, acero, tungsteno, molibdeno, carburo de boro, nitruro de boro y carburo de tantalio. Las **triquitas** también se utilizan como fibras de refuerzo (vea la sección 22.10), se trata de pequeños cristales individuales aciculares que alcanzan entre 1 y $10 \mu\text{m}$ (40 y $400 \mu\text{pulg}$) de diámetro, tienen altas relaciones de aspecto (relación de la longitud de la fibra a su diámetro) que van desde 100 hasta $15\,000$. Debido a su tamaño pequeño, las triquitas están libres de imperfecciones o si las contienen no afectan significativamente su resistencia, la cual se aproxima a la resistencia teórica del material. Los módulos elásticos de las triquitas se encuentran entre 400 y 700 GPa , su resistencia a la tensión está en el orden de 15 a 20 GPa , dependiendo del material.

9.2.2 Tamaño y longitud de las fibras

Las fibras son muy resistentes y rígidas en tensión porque (a) sus moléculas están orientadas en la dirección longitudinal y (b) sus secciones transversales son tan pequeñas, por lo general miden menos de 0.01 mm (0.0004 pulg) de diámetro, que hay una muy baja

probabilidad de existencia de defectos importantes en su constitución. Las fibras de vidrio pueden tener resistencias a la tensión tan altas como 4600 MPa (650 ksi), mientras que la resistencia del vidrio en forma volumétrica (sección 8.4.2) es mucho más baja (vea la tabla 2.2).

Las fibras se clasifican comúnmente como **cortas (discontinuas)** o **largas (continuas)**. Por lo general, las denominaciones “corta” y “larga” se basan en la siguiente distinción: en un tipo dado de fibra, si las propiedades mecánicas mejoran como resultado del aumento de su longitud promedio, se le denomina *fibra corta*; si no hay tal mejora en las propiedades de la fibra, se le llama *fibra larga*. Generalmente, las fibras cortas tienen relaciones de aspecto con valores de entre 20 y 60 y las fibras largas de entre 200 y 500. En los materiales compósitos, los elementos de refuerzo también pueden tener la forma de *fibras cortadas*, *partículas*, *hojuelas* o *fibra continua* (hebras ligeramente retorcidas), *tejidos* (similares a tela), *hilos* (hebras retorcidas) y *esteras* en diversas combinaciones.

9.2.3 Materiales de matriz

En los plásticos reforzados la matriz tiene tres funciones principales:

1. Mantener las fibras en su lugar y transferirles los esfuerzos de modo que puedan soportar la mayor parte de la carga (vea el ejemplo 9.1).
2. Proteger a las fibras contra daño físico y el entorno.
3. Reducir la propagación de grietas en el material compósito, en virtud de la más alta ductilidad y tenacidad de la matriz polimérica.

Los materiales de una matriz suelen ser *termoplásticos* o *termofijos* y, por lo general, consisten en epóxicos, poliésteres, fenólicos, fluorocarbonos, polietersulfonas o silicio. Los materiales más comúnmente utilizados son los epóxicos (presentes en el 80% de todos los plásticos reforzados) y los poliésteres (menos costosos que los epóxicos). Las poliimidas, que resisten la exposición a temperaturas superiores a 300 °C (575 °F), están disponibles para su uso como una matriz con fibras de carbono. Algunos termoplásticos también se utilizan como material de matriz, por ejemplo la polieteretercetona (PEEK). En general, tienen mayor resistencia que los materiales termofijos pero su resistencia a la temperatura es más baja, estando limitada a entre 100 y 200 °C (200 y 400 °F).

9.3 Propiedades de los plásticos reforzados

Las propiedades mecánicas y físicas de los plásticos reforzados dependen del tipo, de la forma y orientación del material de refuerzo, de la longitud de las fibras y de la fracción de volumen (porcentaje) del material de refuerzo. Las fibras cortas son menos eficaces que las fibras largas (figura 9.5) y sus propiedades están fuertemente influidas por la temperatura y el tiempo bajo carga. Las fibras largas transmiten de mejor manera la carga a través de la matriz y es menos probable que se salgan de la matriz (debido a una insuficiencia de corte en la interfase entre la fibra y la matriz), por lo que se utilizan mucho en aplicaciones críticas, particularmente a temperaturas elevadas. Las propiedades físicas de los plásticos reforzados y su resistencia a la fatiga, a la termofluencia y al desgaste dependen en gran medida del tipo y de la cantidad de refuerzo. Los compósitos pueden adecuarse para impartirles propiedades específicas (como permeabilidad y estabilidad dimensional), hacer más fácil su procesamiento y reducir los costos de producción.

Un factor crítico en los plásticos reforzados es la resistencia de la unión entre las fibras y la matriz polimérica, debido a que la carga se transmite a través de la interfase entre la fibra y la matriz. Una unión débil en esta interfase puede causar la **extracción de la fibra** y **deslaminación** del material compósito, particularmente en condiciones ambientales adversas. Puede mejorarse la adhesión en la interfase mediante tratamientos

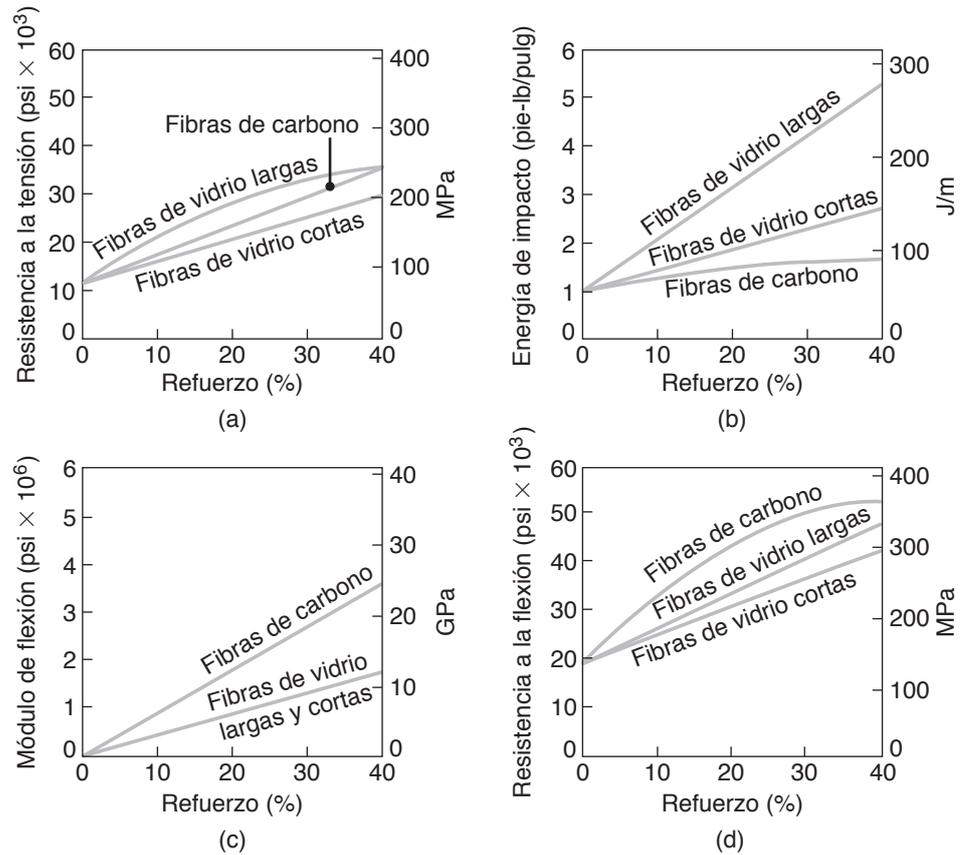


FIGURA 9.5 Efecto del tipo de fibra sobre las diversas propiedades del nailon (6,6) reforzado con fibra. Fuente: Cortesía de la NASA.

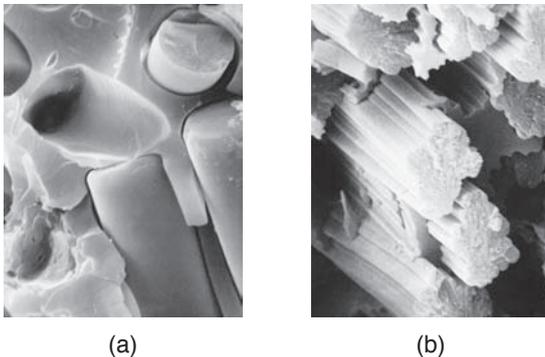


FIGURA 9.6 (a) Superficie de fractura de un compósito epóxico reforzado con fibra de vidrio; las fibras tienen 10 μm (400 μpulg) de diámetro y poseen una orientación aleatoria. (b) Superficie de fractura de un compósito epóxico reforzado con fibra de grafito; las fibras tienen un diámetro de entre 9 y 11 μm, se agrupan en manojos y todas están alineadas en la misma dirección. Fuente: Cortesía de L. J. Broutman.

superficiales especiales, como recubrimientos y agentes de acoplamiento. Las fibras de vidrio, por ejemplo, se tratan con **silano** (un hidruro de silicio) para mejorar su humectación y la unión entre la fibra y la matriz. La importancia de una correcta adherencia puede apreciarse al inspeccionar las superficies de fractura de los plásticos reforzados; por ejemplo, en las figuras 9.6a y b observe la separación que hay entre las fibras y la matriz.

Por lo general, los valores de rigidez más altos, como los de resistencia, en los plásticos reforzados se obtienen cuando las fibras están alineadas en dirección de la fuerza de tensión. En ese caso, el compósito es altamente anisotrópico (figura 9.7); es decir, tiene propiedades tales como resistencia y rigidez que dependen de la dirección. Como resultado, otras propiedades como la resistencia a la termofluencia, la conductividad térmica y eléctrica y la dilatación térmica también son anisotrópicas. Las propiedades transversales de estas estructuras reforzadas en forma unidireccional son mucho menores que las propiedades longitudinales. Por ejemplo, observemos lo fuerte que es la cinta de embalaje reforzada con fibras cuando se jala a tensión y lo fácil que se rompe y separa cuando se jala en dirección de la anchura.

Debido a que es un **material de ingeniería**, una pieza hecha de plástico reforzado puede dar una configuración óptima para

una condición de servicio específica. Por ejemplo, si la pieza debe someterse a esfuerzos en diferentes direcciones, como en recipientes a presión de pared delgada, (a) las fibras pueden atravesarse en la matriz o (b) pueden construirse capas de fibras orientadas en diferentes direcciones en un laminado que tenga propiedades mejoradas en más de una dirección (vea el *bobinado de filamentos*, sección 19.13.3). Por ejemplo, un rotor de volante hecho de un material compuesto que se ha producido utilizando una técnica de tejido especial, en el que las fibras de refuerzo (vidrio E) están alineadas en la dirección radial, y en la dirección del aro. Diseñado para sistemas de almacenamiento de energía mecánica en los vehículos eléctricos e híbridos de baja emisión, el volante puede funcionar a velocidades de hasta 50 000 rpm.

9.3.1 Resistencia y módulo de elasticidad de los plásticos reforzados

La resistencia y el módulo de elasticidad de un plástico reforzado con fibras unidireccionales pueden determinarse en términos de (a) las resistencias y los módulos de las fibras y de la matriz y (b) la fracción de volumen de las fibras presentes en el compuesto. En las siguientes ecuaciones, c se refiere al compuesto, f a la fibra y m a la matriz. La carga de tensión total, P_c , sobre el compuesto es compartida por la fibra (P_f) y la matriz (P_m). Por lo tanto,

$$P_c = P_f + P_m, \quad (9.1)$$

que se puede escribir como

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m, \quad (9.2)$$

donde A_c , A_f y A_m son las áreas de sección transversal del material compuesto, la fibra y la matriz, respectivamente; por lo tanto, $A_c = A_f + A_m$. Ahora denotemos x como la fracción de área de las fibras presentes en el material compuesto. (Observemos que x también representa la fracción de volumen porque las fibras son uniformemente longitudinales en la matriz). Entonces la ecuación (9.2) se puede escribir como

$$\sigma_c = x\sigma_f + (1-x)\sigma_m. \quad (9.3)$$

Ahora es posible calcular la fracción de la carga total soportada por las fibras. En primer lugar, observe que en el compuesto que está bajo una carga de tensión, las deformaciones sufridas por las fibras y la matriz son iguales, es decir, $e_c = e_f = e_m$. Enseguida, recuerde de la sección 2.2 que

$$e = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{AE}.$$

Por consiguiente,

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{A_f E_f}{A_m E_m}. \quad (9.4)$$

Como se conocen las cantidades relevantes para una situación específica, es posible encontrar la fracción P_f/P_c usando la ecuación (9.1). Entonces, si se utilizan las relaciones anteriores, el módulo elástico, E_c , del material compuesto puede calcularse al sustituir σ en la ecuación (9.3) por E . Así,

$$E_c = xE_f + (1-x)E_m. \quad (9.5)$$

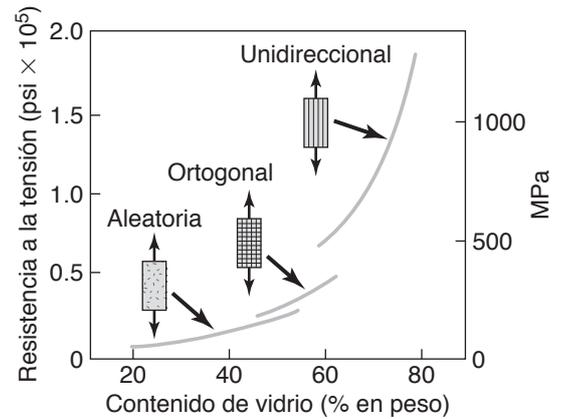


FIGURA 9.7 Resistencia a la tensión del poliéster reforzado con vidrio como una función del contenido de fibra y de la dirección de las fibras en la matriz.

EJEMPLO 9.1 Cálculo de la rigidez de un material compósito y de la carga soportada por las fibras

Dado: Supongamos que un plástico epóxico reforzado con fibras longitudinales de grafito contiene 20% de fibras. El módulo elástico de las fibras es de 300 GPa y el de la matriz epóxica es de 100 GPa.

Se solicita: Calcular el módulo elástico del compósito y la fracción de carga soportada por las fibras.

Respuesta: Los datos dados son $x = 0.2$, $E_f = 300$ GPa y $E_m = 100$ GPa. Usando la ecuación (9.5),

$$\begin{aligned} E_c &= 0.2(300) + (1 - 0.2)100 \\ &= 60 + 80 = 140 \text{ GPa.} \end{aligned}$$

A partir de la ecuación (9.4), se encuentra que la fracción de carga P_f/P_m es

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{0.2(300)}{0.8(100)} = 0.75.$$

Porque

$$P_c = P_f + P_m \quad \text{y} \quad P_m = \frac{P_f}{0.75},$$

se obtiene,

$$P_c = P_f + \frac{P_f}{0.75} = 2.33P_f \quad \text{o} \quad P_f = 0.43P_c.$$

Por lo tanto, las fibras soportan 43% de la carga, a pesar de que ocupan sólo 20% del área de la sección transversal (y por consiguiente del volumen) del material compósito.

9.4 Aplicaciones de los plásticos reforzados

La primera aplicación ingenieril de los plásticos reforzados ocurrió en 1907 para construir un tanque resistente a los ácidos hecho a partir de una resina fenólica con fibras de asbesto. En la década de 1920, se desarrolló la *Formica* (nombre comercial) utilizada comúnmente como contratapa en los muebles. Los epóxicos se utilizaron por primera vez como un material de matriz en la década de 1930. Desde la década de 1940, los barcos se hacen con fibra de vidrio y se utilizan plásticos reforzados para la construcción de aviones, equipos eléctricos y artículos deportivos. Las principales novedades en materiales compósitos iniciaron en la década de 1970, las cuales resultaron en los materiales que ahora se denominan **compósitos avanzados**. Los plásticos híbridos reforzados con fibras de vidrio o de carbono están disponibles para aplicaciones de alta temperatura, con un uso continuo que llega a temperaturas de hasta aproximadamente 300 °C (550 °F).

Los plásticos reforzados se utilizan normalmente en aviones comerciales y militares, componentes de cohetes, aspas de helicóptero, carrocerías de automóviles, muelles, ejes de transmisión, tuberías, escaleras, recipientes a presión, artículos deportivos, cascos, cubiertas o cascos de barcos y en otras diversas estructuras y componentes. Alrededor del 50% (en peso) del Boeing 787 Dreamliner está hecho de materiales compósitos. En virtud de los ahorros en peso resultantes, los plásticos reforzados han reducido en 2% el consumo de combustible en los aviones. El jet jumbo Airbus A380, con una capacidad de hasta 700 pasajeros, tiene elevadores, alerones, cajas de ala y bordes de ataque, soportes del montaje secundario del fuselaje y la estructura de la cubierta hechos a partir de materiales compósitos con fibras de carbono, resinas termofijas y termoplásticos. La parte superior del fuselaje está hecha de capas alternadas de epoxi preimpregnado con refuerzo de aluminio y fibra de vidrio (vea la sección 19.13).

El contorno del marco del bombardero Stealth está hecho de materiales compósitos constituidos por fibras de vidrio y carbono, matrices de resina epóxica, poliimidas para alta temperatura y otros materiales avanzados. Los compósitos reforzados con fibra de boro se utilizan en aviones militares, palos de golf, raquetas de tenis, cañas de pescar y tablas para surfear (figura 9.8). Otro ejemplo es el desarrollo de una pequeña nave fabricada en su totalidad con materiales compósitos (diseño de catamarán de doble casco) para la Marina de Estados Unidos y que tiene la capacidad de alcanzar velocidades de hasta 50 nudos (58 mph). Los desarrollos más recientes incluyen (a) barras

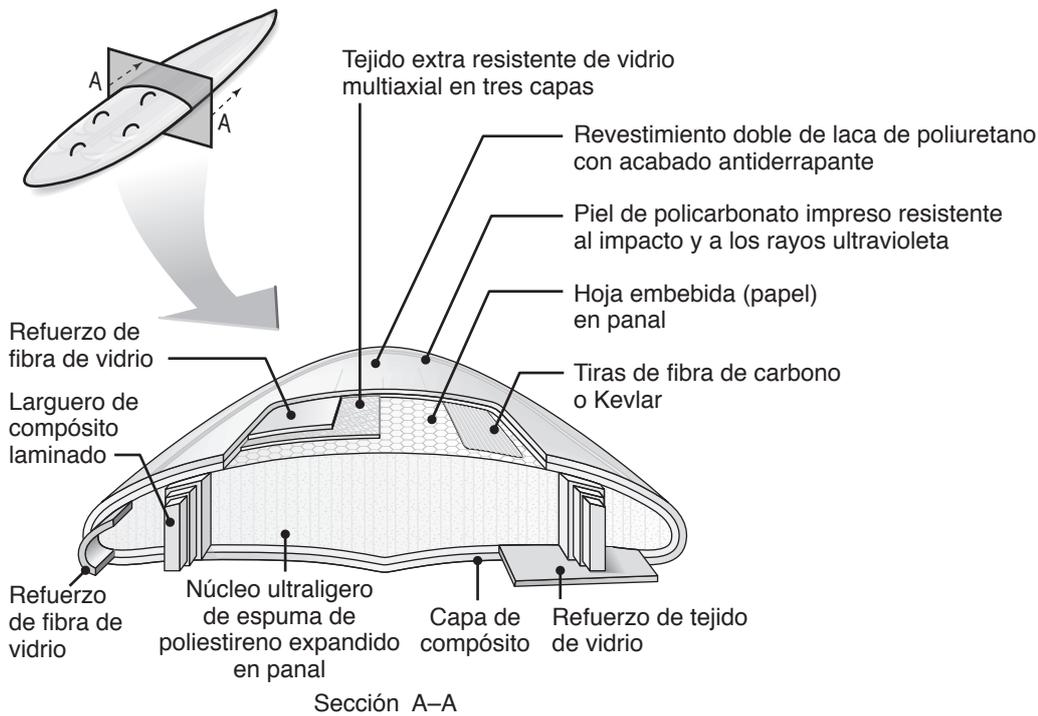


FIGURA 9.8 Sección transversal de una tabla para surf hecha de materiales compuestos, un ejemplo de la construcción con materiales avanzados. Fuente: K. Easterling, *Tomorrow's Materials*, 2a. ed., Institute of Metals, 1990. Cortesía de Maney Publishing. www.maneypublishing.com

de refuerzo para concreto, en sustitución de las barras de acero, reduciendo así los costos involucrados debido a la corrosión y (b) rodillos para la fabricación de papel, e industrias semejantes, con deflexiones menores en comparación con los rodillos de acero tradicionales.

CASO DE ESTUDIO 9.1 Cascos militares y chalecos antibalas hechos de materiales compuestos

El uso de equipos de protección personal, en forma de chalecos antibalas y cascos compuestos, se ha venido generalizando en los ámbitos militares y policíacos. Los chalecos antibalas se basan en fibras tejidas de gran resistencia que impiden la penetración de proyectiles. Para detener una bala, un material compuesto primero debe deformarse o aplanarse, proceso que tiene lugar cuando la punta de la bala entra en contacto con tantas fibras individuales del material compuesto como sea posible, sin que las fibras sean hechas a un lado. El impulso asociado con los proyectiles es sentido por el usuario del chaleco, pero los diseños exitosos contendrán las balas y la metralla y, por lo tanto, evitarán lesiones graves o mortales.

Hay dos tipos básicos de chalecos antibalas: (a) de *armadura suave*, que se basan en varias capas de fibras

tejidas de alta resistencia y están diseñados principalmente para contener balas de pistola, y (b) de *armadura dura*, que utilizan una placa de metal, cerámico o polímero, además de la fibra tejida, y están destinados a proporcionar protección contra ráfagas de rifle y metralla. En la figura 9.9 se muestra un diagrama esquemático de un chaleco antibalas.

Se han usado diversos tipos de mallas de fibra en las aplicaciones para chalecos antibalas. Los distintos proveedores emplean diferentes combinaciones de mallas de fibra y pueden incluir capas adicionales para proporcionar protección contra el trauma por impacto. La primera fibra utilizada para un chaleco antibalas flexible fue la Kevlar 29 (una aramida), que ha sido mejorada a través de varias versiones. Otras formas incluyen Kevlar 49, Kevlar 129 y Kevlar Protera, donde

(continúa)

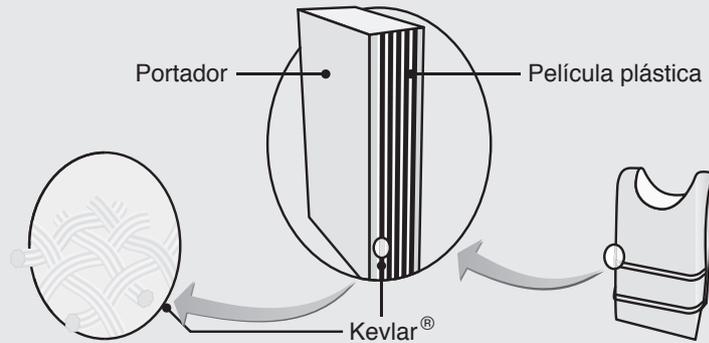


FIGURA 9.9 Ilustración esquemática de un chaleco antibalas que muestra las capas de fibras tejidas.

las capacidades de resistencia a la tensión y absorción de energía se han mejorado gracias al desarrollo de procesos de tejido avanzados para producir las fibras. Las fibras de aramida se usan con mucha frecuencia en los chalecos antibalas flexibles. Honeywell también produce un chaleco antibalas de fibra de aramida, pero otros diseños, como la fibra de aramida Twaron, usan más de mil filamentos finamente tejidos que interactúan entre sí para disipar la energía del impacto.

La fibra Spectra se utiliza para fabricar un compósito empleado en los chalecos antibalas. Una capa del compósito Spectra Shield consiste en dos capas unidireccionales de fibra Spectra dispuestas para cruzarse entre sí con ángulos de 0 y 90° y mantenerse en su sitio mediante una resina flexible. Las capas de fibra y resina se sellan entre dos hojas delgadas de película de polietileno, cuya apariencia es semejante al plástico para envolver alimentos. El chaleco duro utiliza varios diseños, pero por lo general consiste en placas de acero, cerámicos (usualmente óxido de aluminio y sílice) o polietileno, localizadas estratégicamente para evitar la penetración de partículas balísticas a áreas críticas.

Los diseños que se están evaluando en la actualidad utilizan fluidos con nanopartículas de sílice suspendidas; a bajas velocidades de deformación, estos fluidos son no viscosos y fluyen con facilidad. A altas velocidades de deformación típicas de las partículas balísticas, estos fluidos son muy resistentes a la deformación y pueden proporcionar protección adicional (vea también la sección 2.2.7). El fluido está contenido en la malla de fibra tejida (que actúa como una esponja manteniendo al fluido en su sitio) y en la tela exterior.

También se ha producido un casco militar compósito que, pesando lo mismo que los cascos convencionales de manganeso, cubre más partes de la cabeza y ofrece el doble de protección balística y de fragmentación. Este casco tiene una construcción de fibra no tejida, hecha con fibras Spectra en una matriz de polímero termofijo, la cual detiene de manera efectiva la bala al aplanarla en el momento que golpea la primera capa de material.

Fuente: Cortesía de Pinnacle Armor, Allied Signal Corp., y CGS Gallet SA.

9.5 Compósitos de matriz metálica

Por lo general, en los *compósitos de matriz metálica* (MMC, por sus siglas en inglés) los materiales de las matrices son aluminio, aleación de aluminio y litio (más ligera que el aluminio), magnesio, cobre, titanio o superaleaciones (figura 9.10). Los materiales de las fibras son grafito, óxido de aluminio, carburo de silicio, boro, molibdeno o tungsteno. El módulo elástico de las fibras no metálicas oscila entre 200 y 400 GPa, con resistencias a la tensión ubicadas en el intervalo de 2000 a 3000 MPa. Las ventajas de una matriz metálica sobre una matriz polimérica son un módulo elástico más alto y mayor dureza, ductilidad y resistencia a temperaturas elevadas; las limitaciones son una mayor densidad y gran dificultad en el procesamiento de las piezas de material compósito. Las composiciones típicas y aplicaciones de los MMC aparecen en la tabla 9.3.



FIGURA 9.10 Ejemplos de piezas hechas a partir de compósitos de matriz metálica. *Fuente:* Cortesía de la División de Materiales Especiales de 3M.

TABLA 9.3

Materiales compósitos de matriz metálica y sus aplicaciones		
Fibra	Matriz	Aplicaciones
Grafito	Aluminio	Estructuras de satélites, misiles y helicópteros.
	Magnesio	Estructuras espaciales y satélites.
	Plomo	Placas de acumulador.
	Cobre	Contactos eléctricos y cojinetes.
Boro	Aluminio	Aletas de compresor y soportes estructurales.
	Magnesio	Estructuras de antena.
	Titanio	Álabes de ventilador para motores a reacción.
Alúmina	Aluminio	Restricciones de superconductor en reactores de fisión.
	Plomo	Placas de acumulador.
	Magnesio	Estructuras de transmisión para helicópteros.
Carburo de silicio	Aluminio, titanio	Estructuras de altas temperaturas.
	Superaleación	Componentes de motor para altas temperaturas.
	(base de cobalto)	
Molibdeno, tungsteno	Superaleación	Componentes de motor para altas temperaturas.

CASO DE ESTUDIO 9.2 Mordazas de frenos de material compósito con matriz de aluminio

Una de las tendencias en el diseño y la manufactura de automóviles es un mayor esfuerzo hacia el logro de diseños más ligeros con el fin de mejorar el rendimiento y la economía del combustible. Esta tendencia también puede verse en el desarrollo de mordazas de frenos de MMC. Las mordazas de los frenos tradicionales están hechas de hierro fundido y pueden pesar alrededor de 3 kg (6.6 lb) en un automóvil pequeño y hasta 14 kg (30 lb) en un camión. La mordaza de frenos de hierro fundido podría rediseñarse por completo, usando aluminio para lograr ahorros de peso, pero se requeriría

un mayor volumen puesto que la resistencia promedio del aluminio es menor que la del hierro fundido y el espacio disponible entre la rueda y el rotor está muy restringido.

Se diseñó una nueva mordaza de frenos usando una aleación de aluminio reforzada localmente con insertos de compósito prefundido que contienen fibras cerámicas continuas. La fibra es una alúmina nanocrystalina, con diámetro de entre 10 y 12 μm y una fracción de volumen de 65% de fibra. Las propiedades de la fibra y del compósito se resumen en la tabla 9.4. Un análisis

(continúa)

de elemento finito confirmó la colocación y la cantidad de refuerzo, conduciendo a un diseño que superó los requerimientos mínimos de diseño y se ajustó a las deflexiones de las mordazas de hierro fundido en un

entorno restringido. La nueva mordaza de frenos se muestra en la figura 9.11. Tiene un ahorro de 50% en peso con beneficios adicionales en la resistencia a la corrosión y en la facilidad de reciclaje.

TABLA 9.4

Resumen de las propiedades de la fibra y del compuesto utilizados para una mordaza de frenos de automóvil		
Propiedad	Fibra de alúmina	Material compuesto reforzado con alúmina
Resistencia a la tensión	3.1 GPa (450 ksi)	1.5 GPa (220 ksi)
Módulo de elasticidad	380 GPa (55 Mpsi)	270 GPa (39 Mpsi)
Densidad	3.9 g/cm ³	3.48 g/cm ³



FIGURA 9.11 Mordaza de frenos hecha con materiales compósitos de matriz de aluminio usando refuerzo de fibras nanocristalinas de alúmina. Fuente: Cortesía de la División de Materiales Especiales de 3M.

9.6 Compósitos de matriz cerámica

Los *compósitos de matriz cerámica* (CMC, por sus siglas en inglés) se caracterizan por su resistencia a las altas temperaturas y los ambientes corrosivos. Como se describe en la sección 8.3.1, los cerámicos son fuertes y rígidos; resisten altas temperaturas, pero por lo general carecen de tenacidad. Los materiales de matriz que retienen su resistencia hasta los 1700 °C (3000 °F) son el carburo de silicio, nitruro de silicio, óxido de aluminio y la mulita (un compuesto de aluminio, silicio y oxígeno). Los materiales compósitos de matriz de carbono conservan gran parte de su resistencia hasta los 2500 °C (4500 °F), a pesar de que carecen de resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Los materiales de fibra suelen ser carbono y óxido de aluminio. Las aplicaciones de los CMC incluyen componentes de motores a reacción y automotrices, equipos de extracción en aguas profundas, recipientes a presión, componentes estructurales, herramientas de corte y dados para la extrusión y el estirado de metales.

9.7 Otros compósitos

Los compósitos también pueden ser *recubrimientos* de diversos tipos aplicados sobre metales base o sustratos (capítulo 34). Entre los ejemplos se encuentran:

- La deposición de aluminio u otros metales sobre plásticos, generalmente con fines decorativos.
- Esmaltes, para obtener resistencia al desgaste y dureza o con fines decorativos.
- Recubrimientos vítreos (tipo vidrio) en superficies metálicas, para diversos propósitos funcionales u ornamentales.

Los compósitos se convierten en herramientas de corte y dados en la forma de carburos cementados y cermets. Otros compósitos son ruedas de esmeril hechas de óxido de aluminio, carburo de silicio diamante o partículas abrasivas de nitruro de boro cúbico, las cuales se mantienen juntas mediante diversos aglutinantes orgánicos, inorgánicos o metálicos. Un material compósito, utilizado en los lechos de máquinas herramientas para algunos esmeriles de precisión (vea la sección 25.3.1), está constituido por partículas de granito en una matriz epóxica; tiene alta resistencia, buena capacidad de amortiguamiento de las vibraciones (mejor que la del hierro fundido gris) y buenas características de fricción.

CASO DE ESTUDIO 9.3 Compósitos en la industria aeronáutica

Los altos precios del combustible afectan significativamente las operaciones de la industria aeronáutica; los fabricantes de aviones siguen buscando tenazmente cualquier ventaja de diseño que conduzca a una mayor eficiencia o economía del combustible. Un área donde este esfuerzo es más impresionante es en el aumento del contenido de materiales compósitos en los aviones comerciales, como se muestra en la figura 9.12.

Además de la cantidad de materiales compósitos usados, existe una variedad de innovaciones de diseño en los tipos y las aplicaciones de estos materiales, incluyendo:

- El GLARE (por GLASS REINFORCED), que es un aluminio reforzado con vidrio y constituido por diversas capas de polímero reforzado con fibra

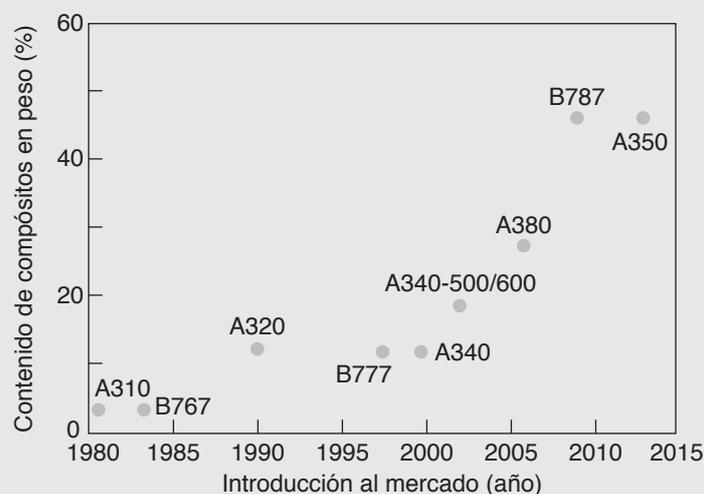


FIGURA 9.12 Contenido de materiales compósitos en los aviones comerciales seleccionados en función del tiempo (medido desde su fecha de introducción al mercado). A = Airbus, B = Boeing.

(continúa)

de vidrio colocadas entre hojas delgadas de aluminio. Se usa en el fuselaje superior del Airbus A380 y en los bordes de ataque de la cola del avión y se le ha reconocido por ahorrar más de 500 kg de peso, en comparación con los materiales utilizados anteriormente. El GLARE también proporciona mejor resistencia a la fatiga y a la corrosión.

- El Boeing 787 Dreamliner, que tiene un fuselaje hecho completamente de materiales compósitos

construidos principalmente a partir de plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP). Además de los ahorros en peso, el fuselaje se construye de una sola pieza y se une extremo con extremo, eliminando la necesidad de utilizar un estimado de 50 000 sujetadores. Los compósitos representan alrededor del 50% del peso del Dreamliner, en comparación con el 12% del avión 777 que se introdujo en 1994.

RESUMEN

- Los materiales compósitos constituyen una clase importante de los materiales de ingeniería con numerosas propiedades atractivas. Las tres categorías principales son los plásticos reforzados con fibras, compósitos de matriz metálica y compósitos de matriz cerámica. Tienen una amplia gama de aplicaciones en las industrias aeronáutica, aeroespacial y del transporte, así como en artículos deportivos y componentes estructurales.
- En los plásticos reforzados con fibras, por lo general las fibras son de vidrio, grafito, aramidas o boro. El poliéster y las resinas epóxicas se utilizan comúnmente como el material de la matriz. Estos compósitos tienen particularmente alta tenacidad y altas relaciones de resistencia a peso y de rigidez a peso.
- En los compósitos de matriz metálica, las fibras suelen ser de grafito, boro, óxido de aluminio, carburo de silicio, molibdeno o tungsteno. Por lo general, los materiales de la matriz son aluminio, aleación de aluminio y litio, magnesio, cobre, titanio o superaleaciones.
- En los compósitos de matriz cerámica, las fibras suelen ser de carbono y óxido de aluminio; los materiales de la matriz son carburo de silicio, nitruro de silicio, óxido de aluminio, carbono o mulita (un compósito de aluminio, silicio y oxígeno).
- Además del tipo y de la calidad de los materiales utilizados, otros factores importantes en la estructura y las propiedades de los materiales compósitos son el tamaño y la longitud de las fibras, su porcentaje de volumen en comparación con el volumen de la matriz, la resistencia de la unión en la interfase de la fibra con la matriz y la orientación de las fibras en la matriz.

TÉRMINOS CLAVE

Compósitos avanzados
Matriz cerámica
Materiales compósitos
Deslaminación

Material de ingeniería
Extracción de la fibra
Fibras
Híbrido

Matriz
Matriz metálica
Matriz polimérica
Precursor

Pirólisis
Plásticos reforzados
Silano
Triquitas

BIBLIOGRAFÍA

Agarwal, B. D., Broutman, L. J. y Chandrashekhara, K., *Analysis and Performance of Fiber Composites*, 3a. ed., Wiley, 2006.
ASM Handbook, Vol. 21: Composites, ASM International, 2001.

Bansal, N. P. (ed.), *Handbook of Ceramic Composites*, Springer, 2004.
Campbell, F. C., *Structural Composite Materials*, ASM International, 2010.

- Cantor, B., Dunne, F. P. E. y Stone, I. C. (eds.), *Metal and Ceramic Matrix Composites*, Taylor & Francis, 2003.
- Chawla, K. K., *Composite Materials: Science and Engineering*, 3a. ed., Springer, 2008.
- Chung, D. D. L., *Composite Materials: Science and Applications*, 2a. ed., Springer, 2010.
- Daniel, I. M. e Ishai, O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*, 2a. ed., Oxford, 2005.
- Fitzer, E. y Manocha, L. M., *Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites*, Springer, 1998.
- Gay D. y Hoa, S. V., *Composite Materials: Design and Applications*, 2a. ed., CRC Press, 2007.
- Krenker, W. (ed.), *Ceramic Matrix Composites: Fiber Reinforced Materials and Their Applications*, Wiley, 2008.
- Strong, A. B., *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*, 2a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 2007.

PREGUNTAS DE REPASO

- 9.1** Distinga entre materiales compósitos y aleaciones metálicas.
- 9.2** Describa las funciones de la matriz y las fibras de refuerzo. ¿Qué diferencias fundamentales existen entre las características de los dos materiales?
- 9.3** Mencione las fibras de refuerzo que se usan generalmente para hacer compósitos. ¿Qué tipo de fibra es más resistente? ¿Qué tipo es más débil?
- 9.4** ¿Cuál es el rango de longitud y el diámetro de las fibras de refuerzo típicas?
- 9.5** Liste los factores importantes que determinan las propiedades de los plásticos reforzados.
- 9.6** Comente sobre las ventajas y limitaciones de los compósitos de matriz metálica, los plásticos reforzados y los compósitos de matriz cerámica, respectivamente.
- 9.7** ¿Cuáles son los materiales de matriz más utilizados? ¿Por qué?
- 9.8** Describa las ventajas de los compósitos híbridos con respecto a los otros compósitos.
- 9.9** ¿Qué propiedades del material se mejoran mediante la adición de fibras de refuerzo?
- 9.10** Describa el propósito del material de la matriz.
- 9.11** ¿Cuáles son los tipos más comunes de fibras de vidrio?
- 9.12** Explique la diferencia entre una fibra de carbono y una fibra de grafito.
- 9.13** ¿Cómo puede una fibra de grafito hacerse conductora eléctrica y térmicamente?
- 9.14** ¿Qué es una triquita? ¿Cuál es la diferencia entre una triquita y una fibra?
- 9.15** Describa la composición de las fibras de boro. ¿Por qué son pesadas?
- 9.16** Realice una definición breve de los términos fibra, hebra y tejido, respectivamente.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 9.17** ¿Cómo cree usted que el uso de paja mezclada con arcilla derivó originalmente en la fabricación de ladrillos para viviendas?
- 9.18** ¿Qué productos ha visto usted que estén hechos de plástico reforzado? ¿Cómo lo sabe?
- 9.19** Describa aplicaciones que no sean muy adecuadas para los materiales compósitos. Explique por qué.
- 9.20** ¿Hay alguna diferencia entre un material compósito y un material que ha sido recubierto? Explique.
- 9.21** Identifique metales y aleaciones que tengan resistencias comparables a las de los plásticos reforzados.
- 9.22** ¿Qué limitaciones o desventajas tienen los materiales compósitos? ¿Qué sugerencias haría usted para superar esas limitaciones?
- 9.23** Proporcione ejemplos de materiales compósitos distintos a los descritos en este capítulo.
- 9.24** Explique por qué el comportamiento de los materiales representados en la figura 9.5 es como se muestra.
- 9.25** Explique por qué las fibras son tan capaces de soportar una parte importante de la carga de tensión en los materiales compósitos.
- 9.26** ¿Los compósitos de matriz metálica tienen alguna ventaja sobre los plásticos reforzados? Explique su respuesta.
- 9.27** Aporte razones para el desarrollo de compósitos de matriz cerámica. Mencione algunas aplicaciones y explique por qué deben ser eficaces.
- 9.28** Explique cómo haría usted para determinar la dureza de plásticos reforzados y materiales compósitos. ¿Las medidas de dureza en este tipo de materiales tienen algún sentido? ¿El tamaño de la indentación hace alguna diferencia? Explique su respuesta.
- 9.29** ¿Cómo haría usted para determinar la resistencia de una fibra?
- 9.30** Se dice que las fibras de vidrio son mucho más resistentes que el vidrio en forma volumétrica. ¿Por qué esto es así?
- 9.31** Describa situaciones en las que podría usarse el vidrio como un material de matriz.
- 9.32** Cuando se establecieron las entidades estadounidenses de las grandes planicies no existían árboles para la construcción de viviendas. Los pioneros cortaron ladrillos de césped —básicamente suelo de las praderas como matriz y hierba y sus raíces

como sistema de refuerzo—. Explique por qué fue exitoso este enfoque.

9.33 Mediante la incorporación de pequeñas cantidades de un agente de soplado es posible fabricar fibras de polímero huecas con núcleos de gas. Liste las posibles aplicaciones de estas fibras.

9.34 En referencia a la figura 9.2c, ¿podría haber una ventaja al usar capas de tela (fibras tejidas) en lugar de pilas de fibra continua sin tejer? Explique su respuesta.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

9.36 Calcule el incremento promedio en las propiedades de los plásticos dadas en la tabla 7.1 como resultado de un refuerzo y haga las observaciones correspondientes.

9.37 En el ejemplo 9.1, ¿cuál sería el porcentaje de la carga soportada por las fibras si su resistencia fuera de 1000 MPa y la resistencia de la matriz de 200 MPa? ¿Cuál sería la respuesta si la rigidez de la fibra se duplicara y la rigidez de la matriz se redujera a la mitad?

9.38 Calcule el porcentaje de incremento en las propiedades mecánicas del nailon reforzado a partir de los datos mostrados en la figura 9.5.

9.39 Grafique E/ρ y $E/\rho^{0.5}$ para los materiales compósitos listados en la tabla 9.1 y compare sus resultados con las propiedades de los materiales descritos en los capítulos 4 a 8 (vea también la tabla 9.2).

9.40 Calcule el esfuerzo en las fibras y en la matriz del ejemplo 9.1. Suponga que el área de sección transversal es de 0.25 pulg² y $P_c = 500$ lb.

9.41 Repita los cálculos del ejemplo 9.1 si (a) se utiliza la fibra Nextel 610 y (b) se usa Spectra 2000.

9.42 Con referencia a las características indicadas en la tabla 7.1, si el acetal se refuerza con fibras de vidrio tipo E, ¿cuál será el rango de contenido de fibras de vidrio en el acetal reforzado?

9.35 ¿Es posible diseñar un material compósito que tenga un módulo de Poisson de cero en una dirección deseada? Explique su respuesta. ¿Es posible diseñar un material compósito que tenga una conductividad térmica de cero en una dirección deseada? Explique su respuesta.

9.43 Grafique el módulo de elasticidad y la resistencia de un material compósito con matriz metálica de aluminio y fibras de carbono de alto módulo como funciones del contenido de fibra.

9.44 Para los datos del ejemplo 9.1, ¿cuál debería ser el contenido de fibra de manera que las fibras y la matriz fallen al mismo tiempo? Utilice un esfuerzo permisible en la fibra de 200 MPa y una resistencia en la matriz de 30 MPa.

9.45 Se desea obtener un material compósito con una rigidez objetivo de 10 GPa. Si se va a utilizar una fibra de carbono de alta resistencia, determine el volumen de fibra requerido si la matriz es de (a) nailon, (b) poliéster, (c) acetal y (d) polietileno.

9.46 Una viga en voladizo rectangular de 100 mm de altura, 20 mm de ancho y 1 m de largo, se somete a una carga concentrada de 50 kg en su extremo. (a) Considere un polímero reforzado con fibras de carbono de alto módulo y una relación volumétrica de fibra de $x = 10\%$. ¿Cuál es la deflexión máxima de la viga si el material de la matriz es poliéster? (b) Obtenga la deflexión de la viga si se utilizara aluminio o acero con las mismas dimensiones de la viga. (c) ¿Qué proporción volumétrica de fibra se requiere para producir la misma deflexión que en las vigas de aluminio o acero? (d) Determine los pesos de las vigas consideradas en los incisos (b) y (c) y compárelos.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

9.47 ¿Qué aplicaciones de los materiales compósitos puede usted imaginar además de las listadas en la sección 9.4? ¿Por qué cree usted que sus aplicaciones serían adecuadas para esos materiales?

9.48 Con la información dada en este capítulo, desarrolle diseños y formas especiales para posibles nuevas aplicaciones de los materiales compósitos.

9.49 ¿Podría un material compósito con una matriz resistente y rígida y un refuerzo suave y flexible tener algún uso práctico? Explique su respuesta.

9.50 Haga una lista de productos para los que el uso de materiales compósitos puede ser ventajoso debido a sus propiedades anisótropas.

9.51 Revise la figura 9.1 y explique cuáles otros componentes del avión, incluyendo la cabina, podrían hacerse con materiales compósitos.

9.52 Mencione aplicaciones en las que tanto la resistencia específica como la rigidez específica sean importantes.

9.53 ¿Qué aplicaciones de los materiales compósitos puede usted imaginar en las cuales sería deseable una alta conductividad térmica? Explique su respuesta.

9.54 Al igual que sucede con otros materiales, las propiedades mecánicas de los materiales compósitos se obtienen mediante la preparación de muestras apropiadas que después se ponen a prueba. Explique cuáles son los problemas que podrían surgir en la preparación de dichas muestras para ensayos de tensión. Proponga métodos para hacer muestras apropiadas, incluyendo su forma y cómo pueden fijarse en las quijadas de las máquinas de prueba.

9.55 En la actualidad están ocurriendo desarrollos en las técnicas de refuerzo tridimensional para materiales compósitos. Describa (a) aplicaciones en las que sea importante la resistencia en dirección del espesor del material compósito y (b) sus ideas sobre cómo lograr esta resistencia. Incluya esbozos simples de la estructura utilizando tales plásticos reforzados.

9.56 Diseñe y describa un ensayo para determinar las propiedades mecánicas de los plásticos reforzados en dirección de su espesor. (Note, por ejemplo, que la madera contrachapada es débil en la dirección de su espesor).

9.57 Como se describe en este capítulo, los plásticos reforzados pueden verse afectados negativamente por el medio ambiente —en particular por la humedad, los productos químicos y las variaciones de temperatura—. Diseñe y describa métodos de prueba para determinar las propiedades mecánicas de materiales compósitos sometidos a estas condiciones ambientales.

9.58 Comente sus observaciones sobre el diseño de la tabla de surf que se ilustra en la figura 9.8.

9.59 Realice un sondeo acerca de diversos equipamientos deportivos e identifique los componentes de materiales compósitos. Explique las razones y las ventajas del uso de compósitos en estas aplicaciones específicas.

9.60 En este capítulo se describieron varias combinaciones y estructuras de materiales. En términos relativos, identifique aquellos que serían adecuados para aplicaciones que involucran lo siguiente: (a) muy bajas temperaturas, (b) muy altas temperaturas, (c) vibraciones y (d) alta humedad.

9.61 Consiga un libro de texto sobre materiales compósitos e investigue la rigidez efectiva de un polímero reforzado con fibra continua. Grafique la rigidez del material compósito como una función de la orientación con respecto a la dirección de la fibra.

9.62 ¿Es posible hacer fibras o triquitas con una sección transversal variable o una fibra “ondulada”? ¿Qué ventajas tendrían estas fibras?

9.63 Describa cómo pueden producirse algunos materiales compósitos simples que utilicen las materias primas disponibles alrededor de una casa. Explique sus planteamientos.

9.64 El *gel spinning* es un proceso especializado que se utiliza en la fabricación de fibras de alta resistencia o con propiedades especiales. Busque en la literatura técnica y escriba un documento breve sobre este tema.

9.65 En la figura P9.65 se muestra una sección de un tejido tridimensional que utiliza un hilado de carpeta para unir entre sí las capas de fibra. Realice una búsqueda en la literatura y determine las ventajas y limitaciones del uso de tejidos tridimensionales como refuerzo en los materiales compósitos.

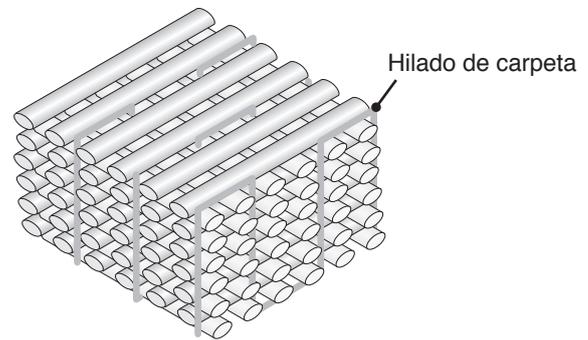


FIGURA P9.65

Procesos y equipos para la fundición de metales

PARTE

II

Tal como se describe en el resto de este libro, existen varios métodos para formar los metales como productos. Uno de los procesos más antiguos es la **fundición**, que básicamente consiste en verter metal fundido en la cavidad de un molde. Tras la solidificación, el metal toma la forma de la cavidad; en la figura II.1 se muestran dos ejemplos de piezas de fundición. La fundición se utilizó por primera vez alrededor del año 4000 a. C., para hacer adornos, puntas de flecha y otros objetos diversos. Hay una amplia variedad de productos que pueden fundirse y el proceso es capaz de generar formas complejas en una sola pieza, incluyendo componentes con cavidades internas como los monoblocks de motor. En la figura II.2 se muestran los componentes fundidos que tiene un automóvil típico, un producto que se utilizó en la introducción a la parte I de este texto para ilustrar la selección y el uso de toda una variedad de materiales. Los procesos de fundición comunes, desarrollados a lo largo de los años, se muestran en la figura II.3.

Como en todas las operaciones de manufactura, cada proceso de fundición tiene sus propias características, aplicaciones, ventajas, limitaciones y costos involucrados. La fundición suele seleccionarse sobre otros métodos de manufactura debido a que:



(a)



(b)

FIGURA II.1 Ejemplos de piezas fundidas. (a) Caja de transmisión hecha de aluminio fundido en dado. (b) Árbol de anillos producido mediante fundición por revestimiento. *Fuente:* (b) Cortesía de Romanoff, Inc.

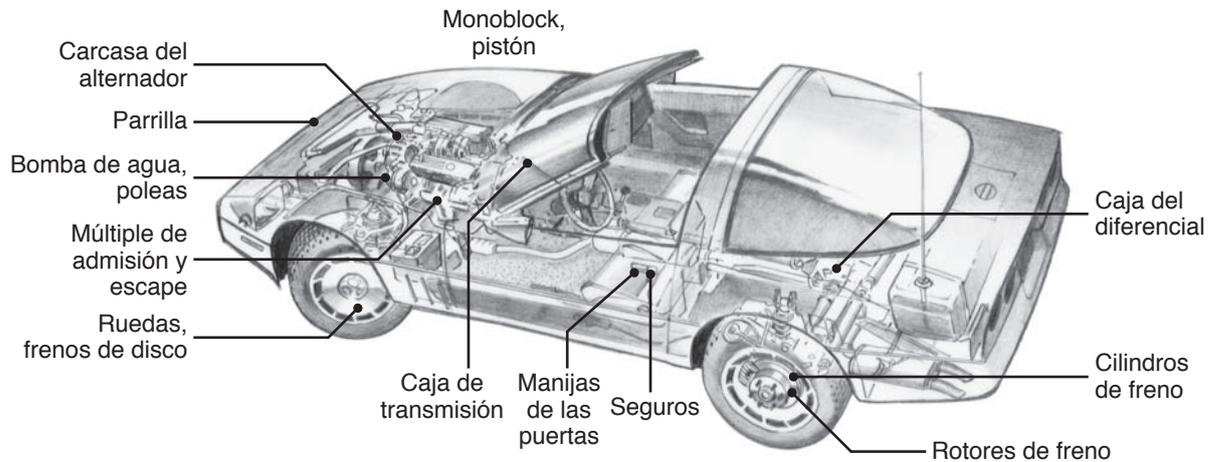


FIGURA II.2 Partes fundidas presentes en un automóvil típico.

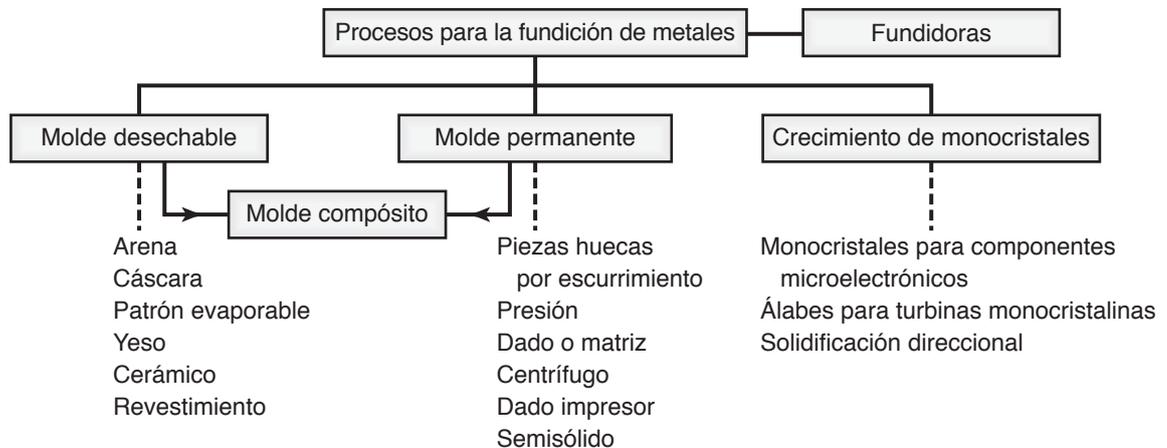


FIGURA II.3 Esquema de los procesos para fundición de metales descritos en la parte II de este libro.

- La fundición puede producir formas complejas y puede incorporar cavidades internas o secciones huecas.
- Es posible producir partes muy grandes en una sola pieza.
- La fundición puede utilizar materiales que son difíciles o poco económicos de procesar mediante otros medios, como los metales duros cuyo maquinado es difícil o se deforman plásticamente.
- El proceso de fundición puede ser competitivo con otros procesos de manufactura.

Casi todos los metales pueden ser fundidos en la forma final deseada o en una muy parecida, con frecuencia requiriendo operaciones de acabado de poca importancia. Esta capacidad coloca a la fundición entre las tecnologías de manufactura de forma neta más importantes, junto con el *forjado de forma neta* (capítulo 14), el estampado (capítulo 16) y la metalurgia de polvos y el moldeo por inyección de metales (capítulo 17). Con las modernas técnicas de procesamiento y el control de la composición química, las propiedades mecánicas de las fundiciones pueden igualar a las de las piezas hechas mediante otros procesos.

Fundamentos de la fundición de metales

CAPÍTULO 10

- La fundición, usada por primera vez hace alrededor de 6000 años, continúa siendo un importante proceso de manufactura para producir piezas muy pequeñas tanto como piezas muy grandes y complejas.
- El primer tema descrito en este capítulo es la solidificación de los metales fundidos, incluyendo las diferencias entre la solidificación de metales puros y la de aleaciones.
- Después se describe el flujo del fluido en la fundición, donde se aplican la ecuación de Bernoulli y las ecuaciones de continuidad con el fin de establecer un marco para efectuar el análisis de flujo de metal fundido a través de las cavidades de un molde.
- Se introduce la importancia de la turbulencia contra el flujo laminar.
- También se analizan la transferencia de calor y la contracción de las piezas fundidas, incluyendo la regla de Chvorinov para el tiempo de solidificación.
- El capítulo concluye con una descripción del porqué de la porosidad en las piezas de fundición y de los métodos comunes para reducirla con el fin de mejorar las propiedades del metal fundido.

10.1	Introducción	237
10.2	Solidificación de los metales	238
10.3	Flujo del fluido	243
10.4	Fluidez del metal fundido	246
10.5	Transferencia de calor	247
10.6	Defectos	249

EJEMPLO:

10.1	Tiempos de solidificación para diversas formas	248
-------------	---	------------

10.1 Introducción

El proceso de **fundición** consiste básicamente en (a) vaciar el metal fundido en un molde, el cual posee una cavidad generada mediante un modelo que tiene la forma de la pieza que desea fundirse, (b) dejar que ésta se solidifique y (c) retirar la pieza del molde. Tal como sucede con todos los otros procesos de manufactura, una comprensión de los temas relacionados resulta esencial para la producción de piezas económicas y de buena calidad, así como para establecer las técnicas adecuadas para el diseño del molde y la práctica de la fundición.

Algunas consideraciones importantes en las operaciones de fundición son:

- El flujo del metal fundido en la cavidad del molde y el diseño de los sistemas de alimentación o vías para que el metal fundido llene la cavidad.
- La solidificación y el enfriamiento del metal en el molde.
- La influencia del material del que está hecho el molde.

En este capítulo se describen las relaciones que tienen lugar entre los muchos factores que intervienen en la fundición. Primero se describe el flujo de metal fundido en la cavidad del molde, en términos del diseño del molde y de las características del flujo del fluido. La solidificación y el enfriamiento de los metales en el molde se ven afectados por diversos factores, incluyendo las propiedades metalúrgicas y térmicas del metal. El tipo de molde también tiene una influencia importante, ya que afecta la velocidad de enfriamiento. El capítulo concluye con una descripción de los factores que influyen en la formación de defectos en las piezas fundidas.

Los procesos de fundición del metal, las consideraciones de diseño y los materiales de fundición se describen en los capítulos 11 y 12. La fundición de cerámicos y plásticos, que involucra métodos y procedimientos un tanto similares a los de metal, se describen en los capítulos 18 y 19, respectivamente.

10.2 Solidificación de los metales

Después de que el metal fundido se vierte en un **molde**, se da lugar a una secuencia de eventos durante la solidificación y el enfriamiento del metal a temperatura ambiente. Estos eventos influyen en gran medida sobre el tamaño, la forma, la uniformidad y la composición química de los granos formados en toda la pieza fundida, los cuales, a su vez, influyen en las propiedades generales de la fundición. Los factores importantes que afectan a estos eventos son el tipo de metal fundido, las propiedades térmicas del metal y del molde, la relación geométrica entre el volumen y el área superficial de la pieza fundida, además de la forma del molde.

10.2.1 Metales puros

Debido a que un metal puro tiene un punto de fusión, o de solidificación, claramente definido, éste se solidifica a una temperatura constante, como se muestra en la figura 10.1. Por ejemplo, el aluminio puro se solidifica a 660 °C (1220 °F), el hierro a 1537 °C (2798 °F) y el tungsteno a 3410 °C (6170 °F) (vea también la tabla 3.1). Después de que la temperatura del metal fundido cae hasta su punto de solidificación, se mantiene constante mientras se libera el *calor latente de fusión*. El *frente de solidificación* (la interfase sólido-líquido) se desplaza a través del metal fundido desde las paredes del molde hacia el centro. Entonces, el metal solidificado, llamado pieza fundida, se retira del molde y se deja enfriar a temperatura ambiente.

Como se muestra en la figura 10.1b y se describe con mayor detalle en la sección 10.5.2, los metales se contraen mientras se enfrían y, generalmente, se contraen tam-

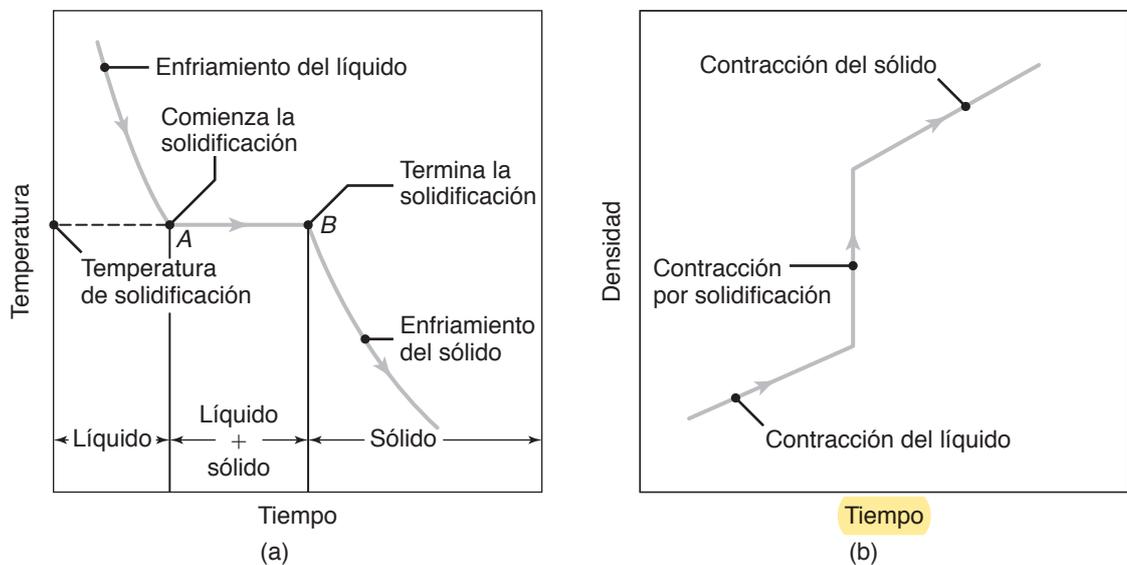


FIGURA 10.1 (a) Temperatura como una función del tiempo para la solidificación de los metales puros; observe que la solidificación ocurre a una temperatura constante. (b) Densidad como una función del tiempo.

bién al solidificarse. Ésta es una consideración importante ya que la contracción puede conducir al microgrietamiento y a la porosidad asociada con éste, factores que pueden afectar negativamente las propiedades mecánicas de la pieza fundida.

Como un ejemplo de la estructura de grano que se desarrolla en una pieza de fundición, la figura 10.2a muestra una sección transversal de un molde con forma de caja. En las paredes del molde, que en un principio están a temperatura ambiente, o que típicamente están mucho más frías que el metal fundido, el metal se enfría rápidamente produciendo una **piel solidificada**, o *cáscara*, de granos equiaxiales finos. Los granos suelen crecer en una dirección opuesta a la de la transferencia de calor a través del molde.

Los granos que tienen una orientación favorable crecen preferencialmente y se denominan **granos columnares** (figura 10.3). Los granos que tienen orientaciones sustancialmente diferentes son restringidos de un crecimiento mayor. A medida que disminuye la fuerza impulsora de la transferencia de calor conforme se aleja de las paredes del molde, los granos se vuelven equiaxiales y burdos. Esta secuencia de desarrollo del grano se conoce como **nucleación homogénea**, lo cual significa que los granos (cristales) crecen sobre sí mismos e inician dicho desarrollo en las paredes del molde.

10.2.2 Aleaciones

En las aleaciones, la solidificación comienza cuando la temperatura cae por debajo del *liquidus*, T_L , y se completa cuando alcanza el *solidus*, T_S (figura 10.4). Dentro de este rango de temperaturas, la aleación se encuentra en estado *blando* o *pastoso* y consiste en **dendritas columnares** (del griego *dendron*, que significa “parecido a”, y *dryes*, que significa “árbol”). Note la presencia de metal líquido entre los brazos de las *dendritas*.

Las dendritas tienen brazos y ramas tridimensionales (*brazos secundarios*) que en algún momento se interconectan, como puede verse en la figura 10.5. Aunque el estudio de las estructuras dendríticas es complejo, resulta importante debido a que tales estructuras pueden contribuir a generar factores perjudiciales como variaciones en la composición, segregación y microporosidad dentro de una pieza de fundición.

El ancho de la **zona blanda**, donde las fases líquida y sólida están presentes, es un factor importante durante la solidificación. Esta zona se describe en términos de una diferencia de temperatura, conocida como **rango de solidificación**, de la manera siguiente:

$$\text{Rango de solidificación} = T_L - T_S. \quad (10.1)$$

En la figura 10.4, se puede observar que los metales puros tienen un rango de solidificación que se aproxima a cero y que el frente de solidificación se mueve como un plano sin desarrollar una zona blanda. Los eutécticos (sección 4.3) se solidifican de manera

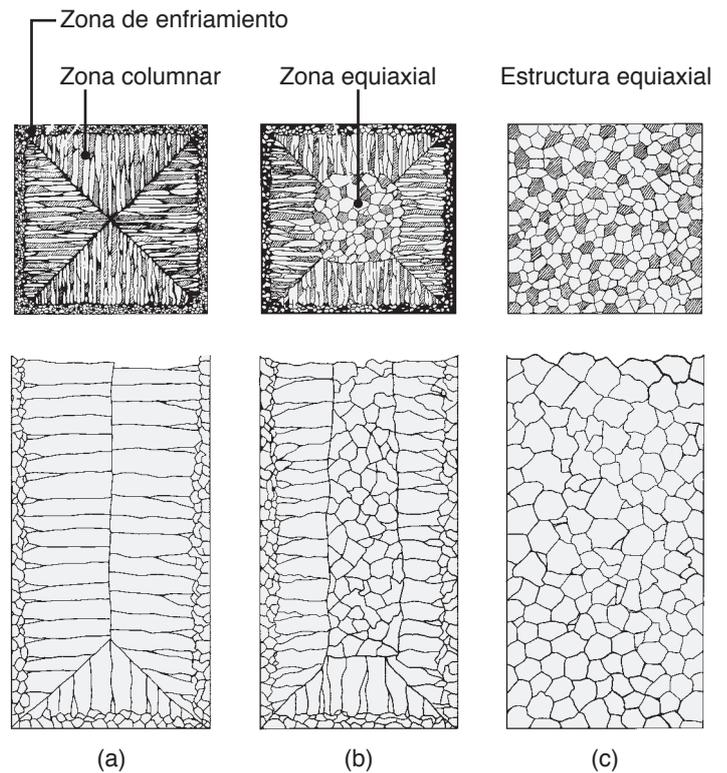


FIGURA 10.2 Ilustración esquemática de tres estructuras fundidas de metales solidificados en un molde cuadrado: (a) metales puros; (b) aleaciones en solución sólida; (c) estructura obtenida usando agentes de nucleación. Fuente: Según G. W. Form, J. F. Wallace, J. L. Walker y A. Cibula.

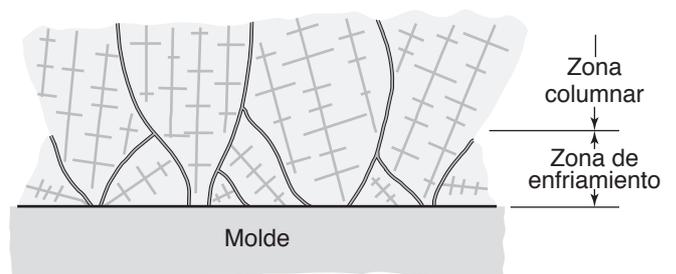


FIGURA 10.3 Desarrollo de una textura preferencial en una pared fría del molde; observe que lejos de la superficie del molde sólo crecen granos orientados favorablemente.

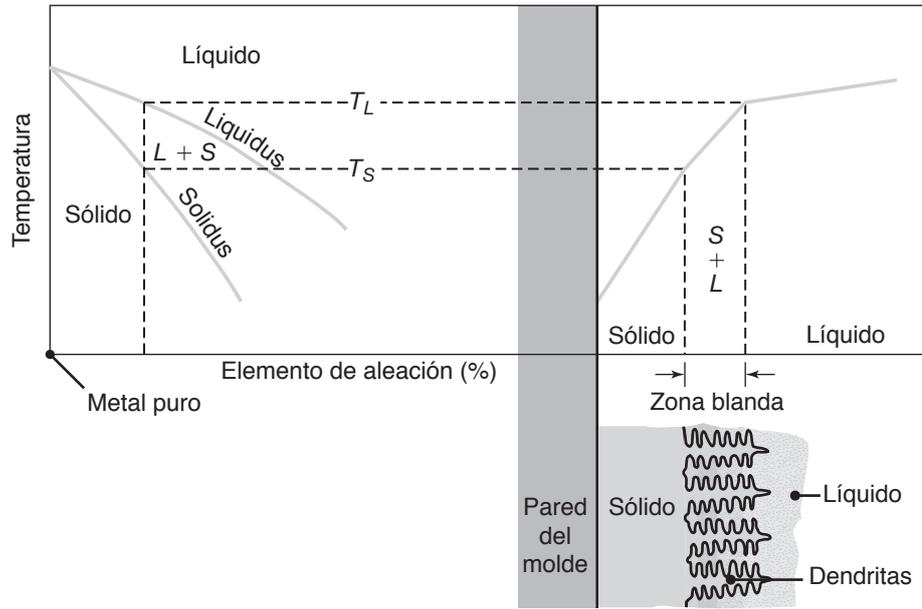
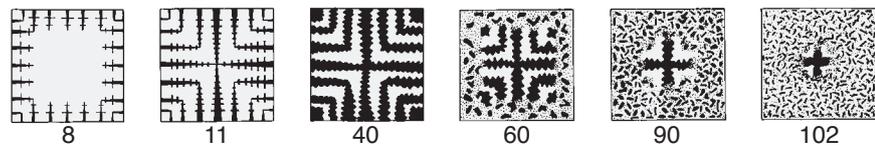
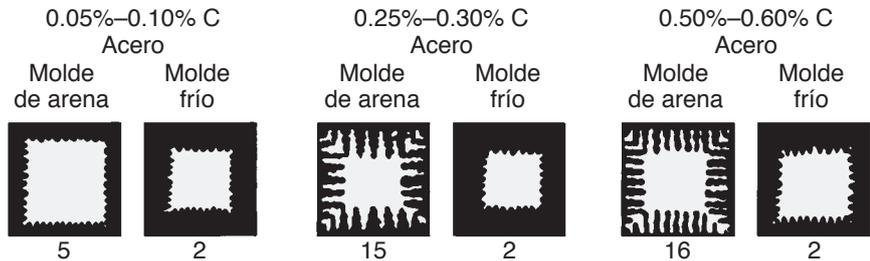


FIGURA 10.4 Ilustración esquemática de la solidificación de una aleación y distribución de la temperatura en el metal en solidificación; observe la formación de dendritas en la zona blanda o pastosa.



Minutos después del vaciado

(a)



Minutos después del vaciado

(b)

FIGURA 10.5 (a) Patrones de solidificación para el hierro fundido gris en una fundición cuadrada de 180 mm (7 pulg). Observe que después de 11 minutos de enfriamiento, las dendritas se alcanzan entre sí, pero la fundición aún está blanda en su totalidad; esta fundición tarda aproximadamente 2 horas en solidificar por completo. (b) Solidificación de aceros al carbono en moldes de arena y fríos (metálicos); note la diferencia en los patrones de solidificación a medida que aumenta el contenido de carbono en el acero. Fuente: Según H. F. Bishop y W. S. Pellini.

similar con un frente esencialmente plano. La estructura desarrollada tras la solidificación depende de la composición del eutéctico. En las aleaciones con un diagrama de fase casi simétrico (vea la figura 4.4), la estructura suele ser laminar, con dos o más fases sólidas presentes, dependiendo del sistema de aleación. Cuando la fracción de volumen de la fase secundaria de la aleación es menor que aproximadamente 25%, la estructura generalmente se convierte en fibrosa. Estas condiciones son particularmente importantes para los hierros fundidos.

Para las aleaciones, un *rango de solidificación corto* suele implicar una diferencia de temperatura de menos de 50 °C (90 °F) y un *rango de solidificación largo* más de 110 °C (200 °F). Por lo general, las fundiciones ferrosas tienen zonas blandas estrechas, mientras que el aluminio y las aleaciones de magnesio tienen zonas blandas anchas. Por consiguiente, estas aleaciones se encuentran en estado blando en la mayor parte de su proceso de solidificación.

Efectos de las velocidades de enfriamiento. Las velocidades de enfriamiento lentas, del orden de 10^2 K/s, o los tiempos de solidificación locales largos, dan como resultado estructuras dendríticas *gruesas*, con gran separación entre los brazos dendríticos. Para velocidades de enfriamiento más altas, del orden de 10^4 K/s, o para tiempos de solidificación locales cortos, la estructura se vuelve *más fina*, con menor espaciado entre los brazos dendríticos. Para velocidades de enfriamiento aún más altas, del orden de entre 10^6 y 10^8 K/s, las estructuras desarrolladas son *amorfas*, como se describe en la sección 6.14.

Las estructuras desarrolladas y el tamaño de grano resultante tienen influencia sobre las propiedades de la pieza fundida. A medida que el tamaño de grano disminuye, la resistencia y la ductilidad de la aleación fundida aumentan, la microporosidad (*huecos por contracción interdendrítica*) disminuye en la fundición y la tendencia de la pieza fundida al agrietamiento (*desgarramiento en caliente*, vea la figura 10.12) durante la solidificación también disminuye. La falta de uniformidad en el tamaño y la distribución de los granos resulta en piezas de fundición con *propiedades anisotrópicas*.

Un criterio que describe la cinética de la interfase líquido-sólido es la relación G/R , donde G es el *gradiente térmico* y R la *velocidad* a la cual se mueve la interfase. Los valores típicos para G se encuentran entre 10^2 y 10^3 K/m y para R entre 10^{-3} y 10^{-4} m/s. Por lo general, las estructuras de tipo dendríticas (figuras 10.6a y b) tienen una relación G/R en el rango que va de 10^5 a 10^7 , mientras que las relaciones entre 10^{10} y 10^{12} producen una interfase líquido-sólido no dendrítica de frente plano (figura 10.7).

10.2.3 Relaciones estructura-propiedad

Debido a que se espera que todas las fundiciones posean ciertas propiedades para cumplir con los requisitos de diseño y servicio, las relaciones entre las propiedades y las estructu-

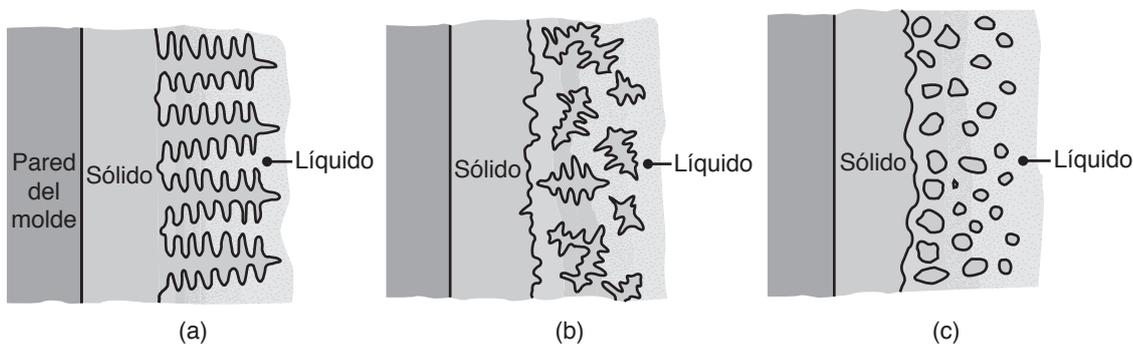


FIGURA 10.6 Ilustración esquemática de tres tipos básicos de estructuras de fundición: (a) dendríticas columnares; (b) dendríticas equiaxiales y (c) no dendríticas equiaxiales. *Fuente:* Cortesía de D. Apelian.

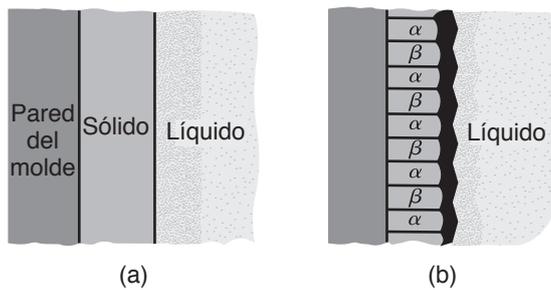


FIGURA 10.7 Ilustración esquemática de las estructuras de fundición en (a) un plano frontal, estructura monofásica, y (b) un plano frontal, estructura bifásica. Fuente: Cortesía de D. Apelian.

ras desarrolladas durante la solidificación son aspectos de calidad importantes. Esta sección describe estas relaciones en términos de la morfología dendrítica y la concentración de elementos aleantes en diversas regiones dentro de la fundición.

Las composiciones de las dendritas y el metal líquido están dadas por el *diagrama de fase* de la aleación particular. Cuando la aleación se enfría muy lentamente, cada dendrita desarrolla una composición uniforme. Sin embargo, bajo las velocidades de enfriamiento más altas encontradas normalmente en la práctica, se forman **dendritas nucleadas**. Estas dendritas tienen una composición superficial diferente a la de sus centros o núcleos; tal diferencia se conoce como *gradiente de concentración*. La superficie de la dendrita tiene mayor concentración de elementos de aleación que su núcleo debido al rechazo de soluto desde el núcleo hacia la superficie durante la solidificación de la dendrita (**microsegregación**). El sombreado más oscuro en el líquido interdendrítico, cerca de las raíces de las dendritas que se muestran en la figura 10.6, indica que estas regiones tienen una concentración de soluto más alta. La microsegregación en estas regiones es mucho más pronunciada que en otras.

Existen varios tipos de **segregación**. En contraste con la microsegregación, la **macrosegregación** implica diferencias de composición en toda la fundición. En situaciones donde el frente de solidificación se aleja de la superficie de una pieza de fundición como un plano (figura 10.7), los componentes que tienen los puntos de fusión más bajos en la aleación que se está solidificando son impulsados hacia el centro (**segregación normal**). Por consiguiente, dichas fundiciones tienen mayor concentración de elementos de aleación en su centro que en sus superficies. En las estructuras dendríticas, como las que se encuentran en las aleaciones de solución sólida (figura 10.2b), se produce lo contrario; es decir, el centro de la pieza fundida tiene una concentración más baja de elementos de aleación (**segregación inversa**) que su superficie. La razón es que el metal líquido (que tiene una concentración más alta de elementos de aleación) entra en las cavidades desarrolladas a partir de la contracción por solidificación ocurrida en los brazos de las dendritas, las cuales se solidifican antes.

Otra forma de segregación se debe a la gravedad. La **segregación por gravedad** implica un proceso por el cual las inclusiones o compuestos de alta densidad se hunden mientras que elementos más ligeros (como el antimonio en una aleación de plomo-antimonio) flotan en la superficie.

En la figura 10.2b se muestra una estructura de fundición típica de una aleación de solución sólida, con una zona interna de granos equiaxiales. Esta zona interior se puede extender por toda la fundición, como se muestra en la figura 10.2c, mediante la adición de un **inoculante** (*agente de nucleación*) a la aleación. El inoculante induce la nucleación de los granos por todo el metal líquido (**nucleación heterogénea**).

Debido a la presencia de *gradientes térmicos* en la solidificación de una masa de metal líquido, y debido a la gravedad y a las diferencias de densidad resultantes, la **convección** tiene una fuerte influencia en las estructuras desarrolladas. La convección implica la transferencia de calor por el movimiento de la materia y, por lo general, en una pieza de fundición que se asocia con el flujo del metal líquido. La convección promueve la formación de una zona de enfriamiento exterior, refina el tamaño de grano y acelera la transición de granos columnares a granos equiaxiales. La estructura que se muestra en la figura 10.6b también puede obtenerse al aumentar la convección en el metal líquido, mediante la cual los brazos dendríticos se separan (**multiplicación dendrítica**). Por el contrario, la reducción o la eliminación de la convección resulta en granos columnares dendríticos más gruesos y más largos.

Los brazos dendríticos no son particularmente fuertes y pueden romperse por agitación o vibración mecánica en las primeras etapas de la solidificación (como en el **formado de metal semisólido** y en la **reofundición** que se describen en la sección 11.4.7). Este proceso resulta en un tamaño de grano más fino, con granos equiaxiales no dendríticos distribuidos de manera más uniforme a lo largo de la pieza fundida (figura 10.6c). Un

beneficio adicional es el comportamiento *tixotrópico* de las aleaciones (es decir, cuando el metal líquido se agita la viscosidad disminuye), lo que mejora la capacidad de fundición del metal. Otro tipo de formado de metal semisólido es la **fundición tixotrópica**, donde primero se calienta un lingote sólido hasta un estado semisólido y luego se le inyecta en un molde de fundición en dado (sección 11.4.5).

10.3 Flujo del fluido

Para enfatizar la importancia del flujo del fluido en la fundición, considere un sistema básico de fundición por gravedad, como se muestra en la figura 10.8. El metal fundido se vierte a través de una **copa de vaciado** o **basín**; después fluye a través del **sistema de alimentación** (que consta de bebedero, canales de alimentación y compuertas) hacia la cavidad del molde. Como se ilustra también en la figura 11.3, el **bebedero** es un canal vertical cónico a través del cual fluye el metal fundido hacia abajo en el molde. Los **canales de alimentación** conducen el metal fundido desde el bebedero hasta la cavidad del molde o conectan el bebedero con la compuerta (la parte del canal de alimentación a través de la cual el metal fundido entra en la cavidad del molde). Las **mazarotas**, llamadas también **alimentadores** (del inglés *feeders*), sirven como depósitos de metal fundido para suministrar el metal fundido necesario y evitar la porosidad debida a la contracción durante la solidificación.

Aunque un sistema de alimentación de este tipo parece ser relativamente simple, una fundición exitosa requiere del adecuado diseño y control del proceso de solidificación para asegurar un flujo correcto de los líquidos en el sistema. Por ejemplo, una función importante del sistema de alimentación en la fundición en arena es atrapar los contaminantes (como óxidos y otras inclusiones) y eliminarlos del metal fundido haciendo que se adhieran a las paredes del sistema de alimentación, lo que les impide llegar a la cavidad del molde. Por otra parte, un sistema de alimentación adecuadamente diseñado ayuda a evitar o reducir al mínimo problemas como el enfriamiento prematuro, la turbulencia y que se atrape gas. Incluso antes de que llegue a la cavidad del molde, el metal fundido tiene que manejarse con cuidado para evitar la formación de óxidos en su superficie o la introducción de impurezas al exponerlo al medio ambiente.

Existen dos principios básicos del flujo del fluido que son relevantes para el diseño del sistema de alimentación: el teorema de Bernoulli y la ley de continuidad de la masa.

Teorema de Bernoulli. Se basa en el principio de conservación de la energía y relaciona la presión, la velocidad, la elevación del fluido en cualquier ubicación en el sistema y las pérdidas por fricción o arrastre en un sistema que está lleno de líquido. La ecuación de Bernoulli es

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante}, \quad (10.2)$$

donde h es la elevación por encima de un determinado nivel de referencia, p es la presión a esa elevación, v es la velocidad del líquido a esa elevación, ρ es la densidad del fluido (asumiendo que es incompresible) y g es la constante gravitacional.

La conservación de la energía exige que, en una ubicación determinada del sistema, se satisfaga la siguiente relación:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + f, \quad (10.3)$$

donde los subíndices 1 y 2 representan dos ubicaciones diferentes en el sistema y f representa la pérdida por fricción en el líquido a medida que viaja a través del sistema. La pérdida por fricción incluye

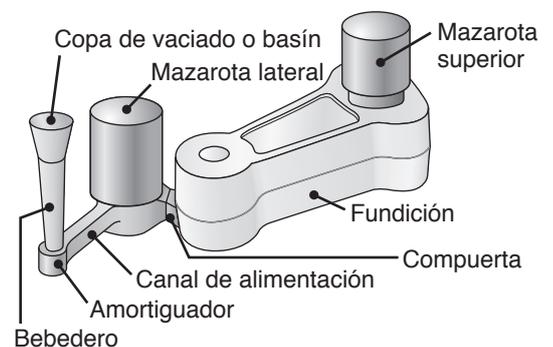


FIGURA 10.8 Ilustración esquemática de una fundición con sistema de alimentación y mazarotas. Las mazarotas sirven como depósitos al suministrar el metal fundido a la pieza fundida conforme ésta se contrae durante la solidificación.

factores como la pérdida de energía en las interfases de la pared del molde con el líquido y en la turbulencia en el líquido.

Continuidad de la masa. La ley de continuidad de la masa establece que, para líquidos incompresibles presentes en un sistema con paredes impermeables, la velocidad del flujo es constante. Por lo tanto,

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2, \quad (10.4)$$

donde Q es la velocidad de flujo del volumen (por ejemplo en m^3/s), A es el área de la sección transversal de la corriente del líquido y v es la velocidad promedio del líquido en esa sección transversal. Los subíndices 1 y 2 se refieren a dos diferentes ubicaciones en el sistema. De acuerdo con esta ley, la velocidad de flujo debe mantenerse en todos los puntos del sistema. La permeabilidad de la pared es importante porque, en caso de no existir, un poco de líquido se escapará a través de las paredes (como ocurre en los moldes de arena) y, por lo tanto, la velocidad de flujo disminuirá a medida que el líquido se desplace a través del sistema. Con frecuencia, se usan recubrimientos para inhibir tal comportamiento en los moldes de arena. Una pequeña cantidad de permeabilidad resulta útil para permitir el escape de gases y ayudar en la transferencia de calor.

Diseño del bebedero. Una aplicación de las ecuaciones de Bernoulli y de continuidad de la masa es el diseño cónico tradicional de los bebederos que se muestran en la figura 10.8. Observe que en un líquido en caída libre (como el agua de un grifo), la sección transversal de la corriente disminuye a medida que el líquido gana velocidad al caer. Por lo tanto, si un bebedero tiene un área de sección transversal constante y el metal fundido se vierte en él, pueden desarrollarse regiones donde el líquido pierde contacto con las paredes del bebedero. Como resultado, puede presentarse **aspiración** (un proceso mediante el cual el aire es aspirado por, o queda atrapado en, el líquido).

Para evitar la aspiración, se emplea una de dos alternativas básicas: (a) el uso de un bebedero cónico para evitar la separación del metal fundido de la pared del bebedero o (b) la utilización de bebederos de lados rectos con un mecanismo de **estrangulación** en la parte inferior, el cual consiste en un núcleo estrangulador o un canal estrangulador, como se muestra en la figura 11.3. El estrangulador retarda el flujo lo suficiente como para evitar la aspiración en el bebedero.

La forma específica de un bebedero cónico que impida la aspiración puede determinarse a partir de las ecuaciones (10.3) y (10.4). Si se supone que en la parte superior la presión del bebedero es igual a la presión en la parte inferior, y que no hay pérdidas por fricción, la relación entre la altura y el área de la sección transversal en cualquier punto del bebedero está dada por la relación parabólica

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}, \quad (10.5)$$

donde, por ejemplo, el subíndice 1 indica la parte superior del bebedero y el 2 denota la parte inferior. Las distancias h_1 y h_2 se miden desde el nivel de líquido en la copa de vaciado o basín (figura 10.8), de modo que h_2 es mayor que h_1 . Por lo tanto, al desplazarse hacia abajo desde la parte superior, el área de sección transversal del bebedero debe disminuir. Se selecciona el área en la parte inferior del bebedero, A_2 , para permitir las velocidades de flujo deseadas, como se describe posteriormente, y el perfil producido está de acuerdo con la ecuación (10.5).

Dependiendo de las consideraciones hechas, también pueden obtenerse expresiones distintas de la ecuación (10.5). Por ejemplo, suponga cierta velocidad del metal fundido, V_1 , en la parte superior del bebedero; después, con base en las ecuaciones (10.3) y (10.4), puede obtenerse una expresión para la relación A_1/A_2 como una función de h_1 , h_2 y V_1 .

Modelado. Otra aplicación de las ecuaciones anteriores tiene lugar en el *modelado del llenado del molde*. Por ejemplo, considere la situación que se muestra en la figura 10.8, donde el metal fundido se vierte en una copa de vaciado o basín; el metal fluye a través de un bebedero hasta un canal de alimentación y una compuerta para llenar la cavidad del molde. Si la copa de vaciado tiene un área de sección transversal mucho más grande que la parte inferior del bebedero, entonces la velocidad del metal fundido en la parte

superior de la copa será muy baja y puede considerarse igual a cero. Si las pérdidas por fricción se deben a una disipación viscosa de la energía entonces, en la ecuación (10.3), f puede tomarse como una función de la distancia vertical y con frecuencia se aproxima como una función lineal. La velocidad del metal fundido que sale por la compuerta se obtiene a partir de la ecuación (10.3) como

$$v = c\sqrt{2gh},$$

donde h es la distancia desde la base del bebedero hasta la altura del metal líquido y c es un factor de fricción. Para un flujo sin fricción, c es igual a la unidad, y para los flujos con fricción, c está siempre entre 0 y 1. La magnitud de c varía con el material del molde, el diseño del canal de alimentación y el tamaño del canal, además puede incluir pérdidas de energía debidas a turbulencia y a efectos de la viscosidad.

Si el nivel del líquido ha alcanzado una altura de x en la compuerta, entonces la velocidad es

$$v = c\sqrt{2g}\sqrt{h-x}.$$

A través de la compuerta, la velocidad del flujo será entonces el producto de esta velocidad y el área de la compuerta, de acuerdo con la ecuación (10.4). La forma de la pieza fundida determinará la altura como una función del tiempo. Al integrar la ecuación (10.4) se obtiene el tiempo de llenado promedio y la velocidad del flujo, y al dividir el volumen de fundición entre esta velocidad de flujo media resulta el tiempo de llenado del molde.

La simulación del llenado del molde ayuda a los diseñadores en la especificación del diámetro del canal de alimentación, así como del tamaño y número de bebederos y copas de vaciado. Para asegurarse de que los canales permanezcan abiertos, el tiempo de llenado debe ser una pequeña fracción del tiempo de solidificación, pero la velocidad no debe ser tan alta como para causar la erosión del material del molde (conocida como *lavado del molde*) u ocasionar un **número de Reynolds** (se describe posteriormente) demasiado alto; en caso contrario, se presenta turbulencia y el arrastre de aire asociado. En la actualidad, existen varias herramientas computacionales disponibles para evaluar los diseños de los sistemas de alimentación y ayudar en el dimensionamiento de componentes; entre estas herramientas están Magmasoft, ProCast, Quikcast, SolidCast, Star-cast, SutCast y PASSAGE/Powercast.

Características del flujo. Una consideración importante del flujo del fluido en los sistemas de alimentación es la presencia de **turbulencia**, en contraste con el *flujo laminar* de los fluidos. La turbulencia es un flujo muy caótico y, en los sistemas de fundición, puede dar lugar a la aspiración. El **número de Reynolds**, Re , se utiliza para cuantificar este aspecto del flujo del fluido; este número representa la relación de las fuerzas *inerciales* sobre las fuerzas *viscosas* presentes en el flujo del fluido y se define como:

$$Re = \frac{vD\rho}{\eta}, \quad (10.6)$$

donde v es la velocidad del líquido, D es el diámetro del canal y ρ y η son la densidad y la viscosidad del líquido, respectivamente.

Cuanto más grande sea el número de Reynolds, mayor será la tendencia a que se produzca un flujo turbulento. Por lo general, en los sistemas de alimentación periódica, Re se encuentra en el intervalo de entre 2000 y 20 000, donde un valor de hasta 2000 representa el flujo laminar. El rango entre 2000 y 20 000 representa una mezcla de flujo laminar y turbulento; una mezcla de este tipo generalmente se considera como inofensiva en los sistemas de alimentación. Por su parte, los valores de Re que superan 20 000 representan turbulencia severa, lo que resulta en un arrastre significativo de aire y en la formación de *escoria* (la espuma que se forma sobre la superficie del metal fundido) a partir de la reacción del metal líquido con el aire y otros gases. Normalmente, las técnicas para minimizar la turbulencia implican evitar los cambios repentinos en la dirección del flujo local y en la geometría de las secciones transversales de los canales al diseñar el sistema de alimentación.

La escoria o los desechos sólo pueden eliminarse mediante la *fundición al vacío* (sección 11.4.2). La fundición atmosférica convencional reduce la escoria o los desechos

mediante (a) el desnatado, (b) el uso de copas de vaciado y sistemas de canales diseñados adecuadamente, o (c) la utilización de filtros, que también pueden eliminar el flujo turbulento en el sistema de alimentación. Por lo general, los filtros están hechos de materiales cerámicos, mica o fibra de vidrio; su ubicación y colocación adecuadas son importantes para el filtrado eficaz de la escoria y los desechos.

10.4 Fluides del metal fundido

La capacidad del metal fundido para llenar las cavidades del molde se denomina *fluides*, la cual consiste en dos factores básicos: (1) las características del metal fundido y (2) los parámetros de la fundición. Aunque el término **colabilidad** es complejo, se utiliza generalmente para describir la facilidad con que un metal puede fundirse para producir una pieza de buena calidad. La colabilidad incluye no sólo la fluides, sino también la naturaleza de las prácticas de fundición.

Las siguientes características del metal fundido influyen en la fluides:

1. Viscosidad. A medida que la viscosidad y su sensibilidad a la temperatura aumentan, la fluides disminuye.

2. Tensión superficial. Una alta tensión superficial del metal líquido reduce la fluides. Debido a esto, las películas de óxido presentes sobre la superficie del metal fundido tienen un efecto adverso significativo en la fluides; por ejemplo, una película de óxido sobre la superficie del aluminio puro fundido triplica la tensión superficial.

3. Inclusiones. Debido a que son insolubles, las inclusiones pueden tener un efecto adverso significativo sobre la fluides. Este efecto se puede verificar mediante la observación de la viscosidad de un líquido (como el aceite) con y sin partículas de arena en él; el líquido con arena tiene mayor viscosidad y, por lo tanto, menor fluides.

4. Patrón de solidificación de la aleación. La manera en que ocurre la solidificación (sección 10.2) puede influir en la fluides. Por otra parte, la fluides es inversamente proporcional al rango de solidificación: cuanto más corto sea el rango (como en los metales puros y eutécticos), mayor será la fluides. Por el contrario, las aleaciones con intervalos de solidificación largos (como las aleaciones de solución sólida) tienen menor fluides.

Los siguientes parámetros de fundición influyen en la fluides tanto como el flujo del fluido y las características térmicas del sistema:

1. Diseño del molde. El diseño y las dimensiones del bebedero, de los canales de alimentación y la mazarota afectan la fluides.

2. Material del molde y sus características superficiales. Cuanto mayor sea la conductividad térmica del molde y más rugosas sean sus superficies, menor será la fluides del metal fundido. Aunque el calentamiento del molde mejora la fluides, hace más lenta la solidificación del metal, por lo que la fundición desarrolla granos de mayor tamaño y, por lo tanto, tiene menor resistencia.

3. Grado de supercalentamiento. El *supercalentamiento* (definido como el incremento de la temperatura de una aleación por encima de su punto de fusión) mejora la fluides al retrasar la solidificación. A menudo, se especifica la **temperatura de vaciado** en lugar del grado de supercalentamiento debido a que se puede especificar más fácilmente.

4. Velocidad de vaciado. Cuanto menor sea la velocidad de vaciado del metal fundido en el molde, menor será la fluides, esto se debe a la más alta velocidad de enfriamiento que tiene lugar cuando se realiza un vaciado lento.

5. Transferencia de calor. Este factor afecta directamente la viscosidad del metal líquido (vea la descripción enseguida).

10.4.1 Pruebas de fluidez

Se han desarrollado varias pruebas para cuantificar la fluidez, aunque ninguna se acepta universalmente. En una de estas pruebas comunes, se hace que el metal fundido fluya a lo largo de un canal que está a temperatura ambiente (figura 10.9); la distancia que fluye el metal antes de solidificarse y dejar de fluir es una medida de su fluidez. Desde luego, esta longitud está en función de las propiedades térmicas del metal y del molde tanto como del diseño del canal. Aun así, tales pruebas de fluidez son útiles y simulan las situaciones de fundición en un grado razonable.

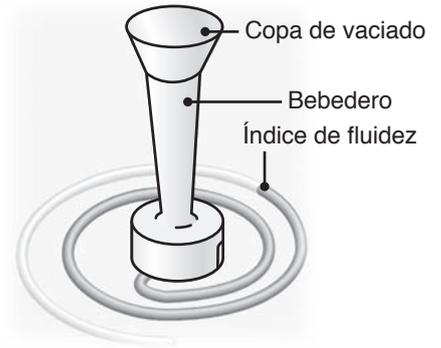


FIGURA 10.9 Método de prueba de fluidez usando un molde en espiral. El índice de fluidez es la longitud del metal solidificado en el paso de la espiral; cuanto mayor sea la longitud del metal solidificado, mayor será la fluidez del metal.

10.5 Transferencia de calor

La transferencia de calor durante el ciclo completo (desde el vaciado hasta la solidificación y el enfriamiento a temperatura ambiente) es otra consideración importante en la fundición de metales. El flujo de calor en diferentes sitios del sistema es un fenómeno complejo y depende de varios factores relacionados con el material fundido, el molde y los parámetros del proceso. Por ejemplo, en la fundición de secciones delgadas, las velocidades de flujo del metal deben ser lo suficientemente altas como para evitar el enfriamiento y la solidificación de modo prematuro. Por otro lado, la velocidad del flujo no debe ser tan alta que cause turbulencia excesiva —con sus efectos perjudiciales en el proceso de fundición.

En la figura 10.10 se muestra una distribución típica de la temperatura en la interfase molde-metal líquido. El calor del metal líquido se emite a través de la pared del molde y hacia el aire circundante. El descenso de la temperatura en las interfases aire-molde y molde-metal es causado por la presencia de capas límite y por contacto imperfecto en estas interfases. La forma de la curva depende de las propiedades térmicas del metal fundido y del molde.

10.5.1 Tiempo de solidificación

Durante las primeras etapas de la solidificación, comienza a formarse una capa delgada en las relativamente frías paredes del molde y, con el paso del tiempo, el espesor de la capa aumenta (figura 10.11). Con paredes de molde planas, el espesor es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo; por lo tanto, al duplicar el tiempo la capa se hará $\sqrt{2} = 1.41$ veces o 41% más gruesa.

El **tiempo de solidificación** es una función del volumen de una pieza de fundición y su área superficial (*regla de Chvorinov*):

$$\text{Tiempo de la solidificación} = C \left(\frac{\text{Volumen}}{\text{Área superficial}} \right)^n, \quad (10.7)$$

donde C es una constante que refleja (a) el material del molde, (b) las propiedades del metal (incluyendo el calor latente) y (c) la temperatura. El parámetro n tiene un valor entre 1.5 y 2, pero generalmente se toma como 2. Por lo tanto, una esfera sólida grande se solidificará y enfriará a temperatura ambiente con un ritmo mucho más lento que una esfera sólida más pequeña. La razón de esto es que el volumen de una esfera es proporcional al cubo de su diámetro, mientras que el área superficial es proporcional al cuadrado de su diámetro. De modo similar, es posible demostrar que el metal fundido en un molde en forma de

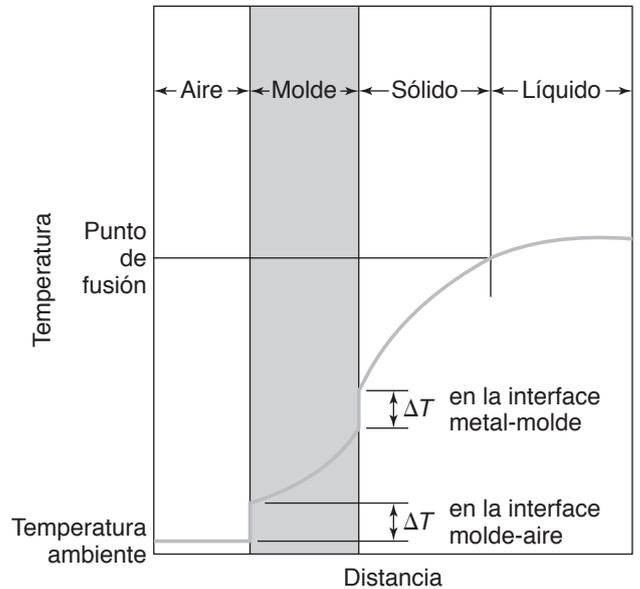


FIGURA 10.10 Distribución de la temperatura en la interfase de la pared del molde y el metal líquido durante la solidificación de los metales presentes en la fundición.

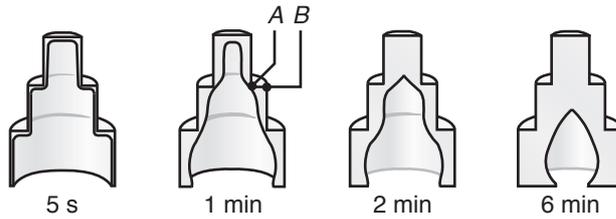


FIGURA 10.11 Capa o piel solidificada en una fundición de acero. El metal fundido restante se vierte en los tiempos indicados en la figura. Algunos objetos ornamentales y decorativos huecos son hechos mediante un proceso llamado fundición de piezas huecas por escurrimiento, el cual se basa en este principio. Fuente: Según H. F. Taylor, J. Wulff y M. C. Flemings.

cubo se solidificará más rápidamente que en un molde esférico del mismo volumen (vea el ejemplo 10.1).

Los efectos de la geometría del molde y el tiempo transcurrido en la formación y el engrosamiento de la capa o piel se muestran en la figura 10.11. Como se ilustra, el metal fundido no solidificado ha sido vaciado desde el molde a intervalos de tiempo que van de 5 segundos a 6 minutos. Observe que (como se esperaba) la piel aumenta su espesor con el tiempo transcurrido y se hace más delgada en los ángulos internos (punto A de la figura) que en los ángulos externos (punto B). Esta última condición es causada por un enfriamiento más lento en los ángulos internos que en los externos.

EJEMPLO 10.1 Tiempos de solidificación para diversas formas

Dado: Tres piezas de metal que se van a fundir tienen el mismo volumen, pero formas diferentes: una de las piezas es una esfera, otra es un cubo y la tercera es un cilindro de altura igual a su diámetro. Suponga que $n = 2$.

Se solicita: ¿Qué pieza se solidificará más rápido y cuál más lentamente?

Respuesta: El volumen de la pieza se toma como la unidad. Por lo tanto, a partir de la ecuación (10.7),

$$\text{Tiempo de solidificación} \propto \frac{1}{(\text{Área superficial})^2}.$$

Las respectivas áreas superficiales son:

Esfera:

$$V = \left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3, \quad r = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/3},$$

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{2/3} = 4.84.$$

Cubo:

$$V = a^3, \quad a = 1 \quad \text{y} \quad A = 6a^2 = 6.$$

Cilindro:

$$V = \pi r^2 h = 2\pi r^3, \quad r = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{1/3},$$

$$A = 2\pi r^2 + 2\pi r h$$

$$= 6\pi r^2 = 6\pi \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{2/3} = 5.54.$$

Los tiempos de solidificación respectivos son:

$$t_{\text{esfera}} = 0.043C, \quad t_{\text{cubo}} = 0.028C,$$

$$t_{\text{cilindro}} = 0.033C.$$

Por lo tanto, la pieza en forma de cubo se solidificará más rápido y la esférica lo hará más lentamente.

10.5.2 Contracción

Debido a sus características de dilatación térmica, los metales suelen contraerse (encogerse) durante la solidificación y mientras se enfrían a temperatura ambiente. La *contracción*, la cual causa cambios dimensionales y a veces distorsiones y grietas, es resultado de los tres eventos secuenciales siguientes:

1. La contracción del metal fundido mientras se enfría antes de su solidificación.
2. La contracción del metal durante el cambio de fase de líquido a sólido.
3. La contracción del metal solidificado (fundición) mientras su temperatura desciende hasta la temperatura ambiente.

La contracción más grande se produce durante el cambio de fase del material de líquido a sólido, pero puede reducirse o eliminarse mediante el uso de mazarotas o la alimentación a presión del metal fundido. En la tabla 10.1, se muestra la cantidad de contracción durante la solidificación de diversos metales; observe que algunos metales (como el hierro fundido gris) se dilatan. La razón es que el grafito tiene un volumen específico relativamente alto y, cuando se precipita como hojuelas de grafito durante la solidificación del hierro gris, provoca una dilatación neta del metal. La contracción, en especial la contracción térmica, se analiza con más detalle en la sección 12.2.1 en relación con las consideraciones de diseño en la fundición.

TABLA 10.1

Contracción o dilatación volumétrica por solidificación para diversos metales fundidos			
Contracción (%)		Dilatación (%)	
Aluminio	7.1	Bismuto	3.3
Zinc	6.5	Silicio	2.9
Al-4.5% Cu	6.3	Hierro gris	2.5
Oro	5.5		
Hierro fundido blanco	4-5.5		
Cobre	4.9		
Latón (70-30)	4.5		
Magnesio	4.2		
90% Cu-10% Al	4		
Aceros al carbono	2.5-4		
Al-12% Si	3.8		
Plomo	3.2		

10.6 Defectos

Durante la manufactura pueden desarrollarse diversos defectos, los cuales dependen de factores como la calidad de las materias primas, el diseño de la fundición y el control de los parámetros de procesamiento. Mientras que algunos defectos repercuten sólo en la apariencia, otros pueden tener importantes efectos perjudiciales para la integridad estructural de las piezas fabricadas.

Existen diversos defectos que pueden desarrollarse en las piezas fundidas, como se ilustra en las figuras 10.12 y 10.13. Debido a que en el pasado se usaban términos diferentes para describir el mismo defecto, el Comité Internacional de Asociaciones Técnicas de Fundición (en inglés International Committee of Foundry Technical Associations) ha desarrollado una nomenclatura normalizada —que consta de siete categorías básicas de defectos de fundición— para identificarlos con letras mayúsculas en negrita:

A—Proyecciones metálicas, consisten en aletas, rebabas o proyecciones, como abultamientos y superficies ásperas.

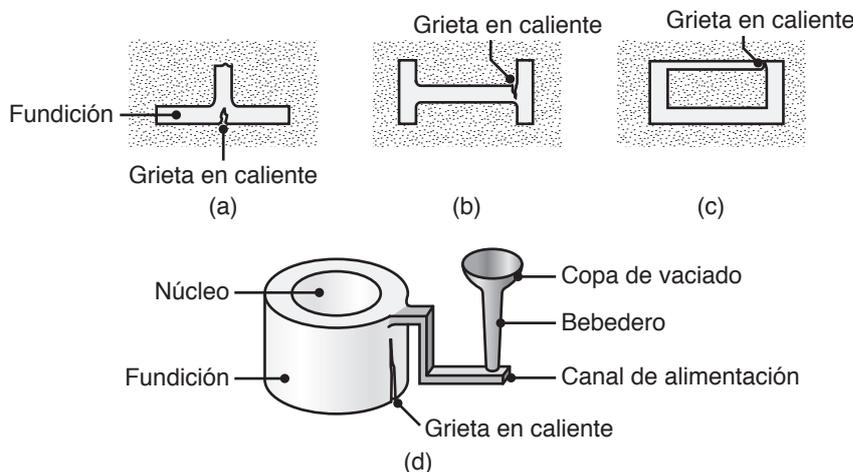


FIGURA 10.12 Ejemplos de grietas en caliente en fundiciones. Estos defectos se producen debido a que la fundición no puede contraerse libremente durante el enfriamiento por limitaciones en diversas partes de los moldes y núcleos. Para controlar el enfriamiento en las secciones críticas y evitar las grietas en caliente, pueden usarse compuestos exotérmicos (que generan calor, por ejemplo un compensador exotérmico).

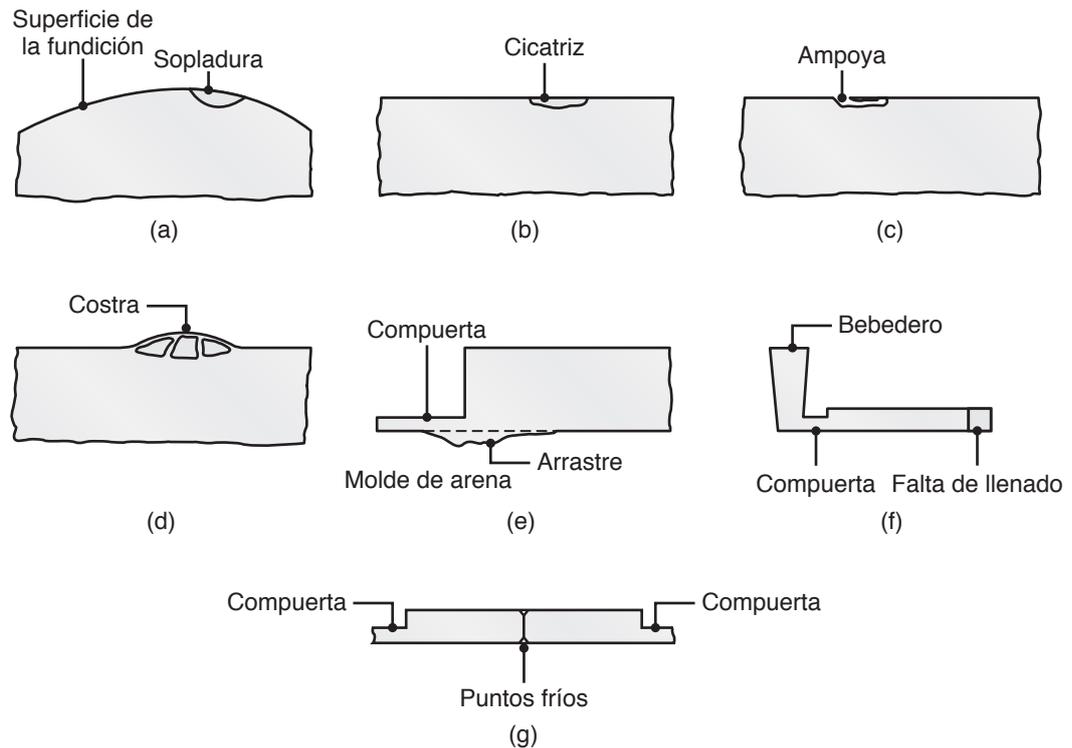


FIGURA 10.13 Ejemplos de defectos comunes en fundiciones; estos defectos pueden minimizarse o eliminarse mediante el diseño apropiado y una preparación adecuada de los moldes, así como al controlar los procedimientos de vaciado. Fuente: Según J. Datsko.

- B—Cavidades**, consisten en cavidades internas o expuestas redondeadas o ásperas, como sopladuras, picaduras y cavidades por contracción (vea *porosidad*, sección 10.6.1).
- C—Discontinuidades**, como grietas, grietas o desgarramientos en frío o en caliente y puntos fríos. Si el metal en solidificación se ve limitado de contraerse libremente, puede presentar agrietamiento y fractura. Aunque hay diversos factores implicados en las grietas, el tamaño de grano grueso y la presencia de segregados con bajo punto de fusión a lo largo de los límites de grano del metal aumentan la tendencia al agrietamiento en caliente. En una pieza de fundición, un *punto frío* es una interfase que carece de fusión completa debido al encuentro de dos corrientes de metal líquido provenientes de distintas compuertas.
- D—Superficie defectuosa**, como pliegues, traslapes, cicatrices, capas de arena adheridas y cascarilla de óxido en la superficie.
- E—Fundición incompleta**, como *falta de llenado* (debido a solidificación prematura), volumen insuficiente de metal vertido y *fugas* (por la pérdida de metal en el molde después de vaciar). También pueden resultar piezas fundidas incompletas a partir de metal fundido a una temperatura demasiado baja o porque el metal se haya vaciado muy lentamente.
- F—Forma o dimensiones incorrectas**, debido a factores como una tolerancia inadecuada para la contracción, errores en el montaje del modelo, una contracción irregular, un modelo deformado o una fundición deformada.
- G—Inclusiones**, se forman durante la fusión, la solidificación y el moldeo. Generalmente son no metálicas, se consideran perjudiciales debido a que actúan como concentradores de esfuerzo y, por lo tanto, reducen la resistencia de la pieza fundida. Las inclusiones pueden formarse durante la fusión cuando el metal fundido reacciona con el medio (generalmente oxígeno), con el crisol o con el

material del molde. Las reacciones químicas entre los componentes del propio metal fundido pueden producir inclusiones. Las escorias y otro material extraño atrapado en el metal fundido también se convierten en inclusiones, aunque el metal fundido filtrado puede eliminar partículas tan pequeñas como de 30 μm . Por último, el desprendimiento de las superficies del molde y del núcleo puede producir inclusiones, lo que indica la importancia de la calidad de los moldes y de su mantenimiento.

10.6.1 Porosidad

En una fundición, la *porosidad* puede ser causada por *contracción*, por *gases* arrastrados o disueltos o por ambos factores. Las regiones porosas pueden desarrollarse en las fundiciones debido a la **contracción** del metal solidificado. Las secciones delgadas de una pieza de fundición se solidifican antes que las regiones más gruesas y, como resultado, el metal fundido fluye hacia las regiones más gruesas que aún no se hayan solidificado. Las regiones porosas pueden desarrollarse en los centros o núcleos debido a la contracción que tiene lugar a medida que las superficies de la región más gruesa comienzan a solidificarse primero. También puede desarrollarse *microporosidad* cuando el metal líquido se solidifica y se contrae entre las dendritas y entre las ramas de las dendritas.

La porosidad es perjudicial para la resistencia y ductilidad de una fundición tanto como para su acabado superficial, vuelve a la fundición potencialmente permeable, lo que afecta el sellado de un recipiente a presión fundido.

La porosidad causada por contracción puede reducirse o eliminarse por diversos medios, incluyendo los siguientes:

- Debe suministrarse el metal líquido adecuado para evitar las cavidades causadas por contracción.
- Los enfriadores internos o externos, como los utilizados en la fundición en arena (figura 10.14), también son un medio eficaz de reducir la porosidad por contracción. La función de los enfriadores es aumentar la velocidad de solidificación en regiones críticas. Los enfriadores internos se hacen generalmente a partir del mismo material que la pieza fundida en sí y se dejan en la pieza fundida. Sin embargo, pueden surgir problemas que involucran la propia fusión de los enfriadores internos con la fundición; por lo tanto, en las fundiciones se suele evitar el uso de enfriadores internos. Los enfriadores externos pueden estar hechos del mismo material que la fundición o pueden hacerse de hierro, cobre o grafito.
- Con las aleaciones, la porosidad puede reducirse o eliminarse mediante altos gradientes de temperatura, es decir, al aumentar la velocidad de enfriamiento; por ejemplo, para hacer el molde, se pueden utilizar materiales con mayor conductividad térmica.
- Otro método para reducir la porosidad consiste en someter la fundición a una presión isostática en caliente (vea la sección 17.3.2).

Debido a que los *gases* son más solubles en los metales líquidos que en los sólidos (figura 10.15), cuando un metal comienza a solidificarse los gases disueltos son expulsados de la solución; los gases también pueden producirse debido a las reacciones

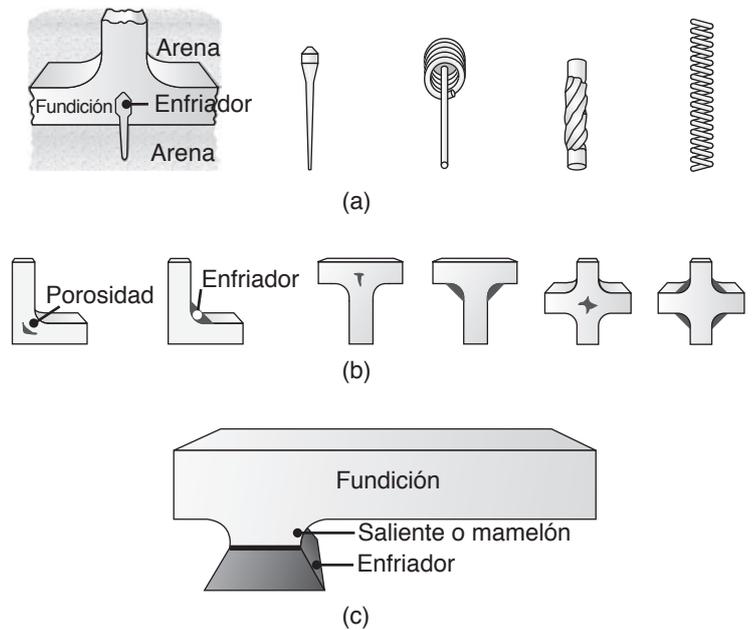


FIGURA 10.14 Diversos tipos de enfriadores (a) internos y (b) externos (áreas oscuras en las esquinas) utilizados en las fundiciones para eliminar la porosidad causada por contracción. Los enfriadores se colocan en las regiones donde hay mayor volumen de metal, como se muestra en (c).

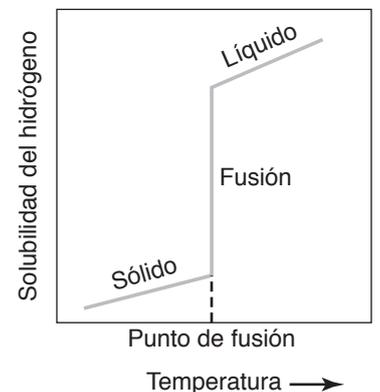


FIGURA 10.15 Solubilidad del hidrógeno en aluminio; observe la abrupta disminución de la solubilidad a medida que el metal fundido comienza a solidificarse.

del metal fundido con los materiales del molde. Los gases se acumulan en las regiones con porosidad existente (como en las regiones interdendríticas) o bien causan microporosidad en la pieza fundida, especialmente en hierro fundido, aluminio y cobre. Los gases disueltos pueden eliminarse del metal fundido mediante el *lavado* o *purga* con un gas inerte o por fusión y vaciado del metal al vacío. Si el gas es oxígeno disuelto, el metal fundido puede ser *desoxidado*. Por lo general, el acero puede ser desoxidado con aluminio, silicio, aleaciones a base de cobre con materiales que soportan fósforo, cobre, titanio o zirconio.

Ya sea que la microporosidad resulte de la contracción o sea causada por gases, su origen puede ser difícil de determinar. Si la porosidad es esférica y tiene paredes lisas (similares a las de los orificios en el queso suizo), suele producirse a partir de gases. Si las paredes son ásperas y angulares, es probable que la porosidad se haya generado por contracción entre las dendritas. El grueso de la porosidad proviene de la contracción y suele llamarse **cavidad de contracción**.

RESUMEN

- La fundición es un proceso de solidificación donde el metal fundido se vierte en un molde y se deja enfriar. El metal puede fluir a través de una variedad de pasajes (copas de vaciado, bebederos, canales de alimentación, mazarotas y sistemas con compuertas de alimentación) antes de llegar a la cavidad del molde. El teorema de Bernoulli, la ley de continuidad y el número de Reynolds son herramientas analíticas que se utilizan para el diseño de fundiciones con los objetivos de lograr una velocidad de flujo adecuada y eliminar los defectos asociados con el flujo del fluido.
- La solidificación de metales puros se lleva a cabo a una temperatura constante, mientras que la solidificación de aleaciones se produce en un rango de temperaturas. Los diagramas de fase son herramientas importantes para identificar el punto o los puntos de solidificación para metales tecnológicamente importantes.
- La composición y las velocidades de enfriamiento del metal fundido afectan el tamaño y la forma de los granos y las dendritas en la solidificación de la aleación; a su vez, el tamaño y la estructura de los granos y las dendritas influyen sobre las propiedades de la fundición solidificada. El tiempo de solidificación es una función del volumen y la superficie de la fundición (regla de Chvorinov).
- En las fundiciones, la estructura del grano puede controlarse por diversos medios para obtener las propiedades deseadas. Debido a que la mayoría de los metales se contraen durante la solidificación y el enfriamiento, es posible que se formen cavidades en la fundición. La porosidad causada por los gases desprendidos durante la solidificación puede ser un problema significativo, particularmente debido a su efecto adverso sobre las propiedades de las piezas fundidas. También existen varios defectos que pueden desarrollarse en las fundiciones por falta de control de las variables del proceso y de los materiales.
- Los cambios dimensionales y las grietas (desgarramiento en caliente) son dificultades que pueden surgir durante la solidificación y el enfriamiento. Se han identificado varias categorías básicas de los defectos presentes en las fundiciones.

TÉRMINOS CLAVE

Aspiración	Dendrita nucleada	Microsegregación	Reofundición
Bebedero	Enfriadores	Molde	Segregación
Canal de alimentación	Fluidez	Nucleación heterogénea	Segregación normal
Compuerta	Fundición	Nucleación homogénea	Sistema de alimentación
Contracción	Grano columnar	Número de Reynolds	Solidificación
Copa de vaciado	Inoculante	Piel (película)	Teorema de Bernoulli
Dendrita	Macrosegrecación	Porosidad	Turbulencia
Dendrita columnar	Mazarota	Rango de solidificación	Zona blanda o pastosa

BIBLIOGRAFÍA

- Analysis of Casting Defects, American Foundrymen's Society 2002.
- ASM Handbook, Vol. 15: Casting, ASM International, 2008.
- Blair, M., Stevens, T. L. y Linskey B. (eds.), Steel Castings Handbook, 6a. ed., ASM International, 1995.
- Campbell, J., Castings, Butterworth-Heinemann, 2a. ed., 2003.
- Campbell, J., Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design, Butterworth-Heinemann, 2011.
- Cantor, B. y O'Reilly K., Solidification and Casting, Taylor & Francis, 2002.
- Glicksmann, M. E., Principles of Solidification: An Introduction to Modern Casting and Crystal Growth Concepts, Springer, 2010.
- Poirer, D. R. y Poirer, E. J., Heat Transfer Fundamentals for Metal Casting, Wiley, 1998.
- Reikher, A. y Barkhudarov, M., Casting: An Analytical Approach, Springer, 2008.
- Stefanescu, D. M., Science and Engineering of Casting Solidification, 2a. ed., Springer, 2008.

PREGUNTAS DE REPASO

- 10.1** Explique por qué la fundición es un proceso de manufactura importante.
- 10.2** ¿Por qué la mayoría de los metales se contraen al fundirlos?
- 10.3** ¿Cuáles son las diferencias entre la solidificación de metales puros y la de aleaciones metálicas?
- 10.4** ¿Qué son las dendritas? ¿Por qué se llaman así?
- 10.5** Describa la diferencia entre los rangos de solidificación cortos y los largos.
- 10.6** ¿Qué es el supercalentamiento? ¿Es importante? ¿Cuáles son las consecuencias del supercalentamiento excesivo?
- 10.7** Defina contracción y porosidad. ¿Cómo se puede saber si las cavidades presentes en una fundición se deben a porosidad o a contracción?
- 10.8** ¿Cuál es la función de los enfriadores? ¿De qué están hechos?
- 10.9** ¿Por qué es importante el número de Reynolds en la fundición?
- 10.10** ¿Qué es un bebedero? ¿Qué forma debe tener un bebedero si el molde no tiene otros medios de estrangulación?
- 10.11** ¿Cómo se define la fluidez? ¿Por qué es importante?
- 10.12** Explique las razones de la formación de grietas en caliente en las fundiciones.
- 10.13** ¿Por qué es importante eliminar la escoria y los desechos durante el vaciado del metal fundido en el molde? ¿Qué métodos de eliminación se utilizan?
- 10.14** ¿Por qué es importante la ecuación de Bernoulli en la fundición?
- 10.15** Describa la fundición tixotrópica y la reofundición.
- 10.16** ¿Qué es la regla de Chvorinov?
- 10.17** ¿Cómo se relaciona una ampolla con una costra?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 10.18** ¿Hay porosidad en una barra de chocolate? ¿En un cubo de hielo? Explique sus respuestas.
- 10.19** Describa las etapas involucradas en la contracción de los metales durante la fundición.
- 10.20** Explique los efectos de los materiales del molde sobre el flujo del fluido y la transferencia de calor en las operaciones de fundición.
- 10.21** Se sabe que el vaciado de metal a una alta velocidad en un molde puede tener ciertas desventajas. ¿Existen algunos inconvenientes por verter muy lentamente?
- 10.22** Describa los eventos representados en la figura 10.5.
- 10.23** ¿Estaría usted preocupado por dejar algunas porciones de los enfriadores internos en la fundición? Explique su respuesta.
- 10.24** Revise la figura 10.8 y haga un resumen en el que explique la finalidad de cada componente mostrado y las consecuencias de omitir ese componente en el diseño del molde.
- 10.25** Haga una gráfica de volumen contra temperatura para un metal que se contrae al enfriarse desde su estado líquido hasta la temperatura ambiente. En la gráfica, indique el área donde la contracción se ve compensada por las mazarotas.
- 10.26** ¿Qué demostraciones prácticas puede sugerir usted para indicar la relación entre el tiempo de solidificación y el volumen y el área superficial de una fundición?
- 10.27** Explique por qué es posible que una fundición deba someterse a diversos tratamientos térmicos.
- 10.28** Liste y explique las razones por las que puede desarrollarse porosidad en una fundición.
- 10.29** ¿Por qué la porosidad tiene efectos perjudiciales sobre las propiedades mecánicas de las fundiciones? ¿Las propiedades físicas, como las conductividades térmica y eléctrica, también pueden verse afectadas negativamente por la porosidad? Explique su respuesta.
- 10.30** Un volante con rayos debe fundirse en hierro gris. Para evitar las grietas en caliente en los rayos, ¿usted los aislaría o les añadiría enfriadores? Explique su respuesta.
- 10.31** ¿Cuáles de las siguientes consideraciones son importantes para que una mazarota funcione correctamente? ¿La mazarota debe (a) tener un área superficial mayor que la pieza que se va a fundir, (b) mantenerse abierta a la presión atmosférica y/o (c) solidificarse primero? Explique su respuesta.

10.32 Explique por qué en la ecuación (10.7) la constante C depende del material del molde, de las propiedades del metal y de la temperatura.

10.33 ¿Los enfriadores externos son tan efectivos como los enfriadores internos? Explique su respuesta.

10.34 Explique por qué, como se muestra en la tabla 10.1, el hierro gris experimenta dilatación en vez de contracción durante su solidificación.

10.35 En referencia a la figura 10.11, explique por qué las esquinas internas, como A , desarrollan una piel o película más delgada que las esquinas externas, como B , durante la solidificación.

10.36 Observe la forma de las dos mazarotas mostradas en la figura 10.8 y comente sus observaciones en relación con la ecuación (10.7).

10.37 ¿Hay alguna diferencia en la tendencia a la formación de huecos por contracción en los metales si existen rangos de solidificación cortos o si éstos son largos? Explique su respuesta.

10.38 ¿Cuál es la influencia del área de la sección transversal del canal en espiral mostrado en la figura 10.9 sobre los resultados de la prueba o ensayo de fluidez? ¿Cuál es el efecto de la altura del bebedero? Si esta prueba se realizara con toda la preparación de la prueba calentada a temperaturas elevadas, ¿los resultados serían más útiles? Explique su respuesta.

10.39 Durante mucho tiempo se ha observado que (a) la baja temperatura de vaciado (es decir, el sobrecalentamiento bajo)

promueve la formación de granos equiaxiales y no de granos columnares y (b) los granos equiaxiales se vuelven más finos a medida que disminuye la temperatura de vaciado. Explique estos dos fenómenos.

10.40 En la fundición de aleaciones metálicas, ¿qué puede esperarse si el molde se agita (vibra) en forma agresiva después de que el metal fundido ha estado en el molde durante un periodo suficiente como para formar una piel o película?

10.41 Si usted observa un cubo de hielo típico, es probable que vea burbujas de aire y grietas en el interior del cubo. Sin embargo, algunos hielos son de forma tubular y no tienen burbujas de aire o grietas visibles en su estructura. Explique este fenómeno.

10.42 ¿Cómo se puede saber si las cavidades presentes en una fundición se deben a la contracción o a burbujas de aire atrapadas?

10.43 Describa los inconvenientes de tener una mazarota (a) demasiado grande y (b) demasiado pequeña.

10.44 Reproduzca la figura 10.2 para una fundición con forma esférica.

10.45 Liste las variables del proceso que afectan el índice de fluidez mostrado en la figura 10.9.

10.46 Suponga que usted tiene un método para medir la porosidad en una fundición. ¿Podría utilizar esa información para predecir con precisión la resistencia de la fundición? Explique su respuesta.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

10.47 Una fundición redonda tiene 0.2 m (7.9 pulg) de diámetro y 0.75 m (29.5 pulg) de longitud. Otra fundición del mismo metal tiene una sección transversal elíptica, con una relación de eje mayor sobre eje menor de 2, y posee la misma longitud y área de sección transversal que la fundición redonda. Ambas piezas se funden en las mismas condiciones. ¿Cuál es la diferencia en los tiempos de solidificación de las dos piezas de fundición?

10.48 Un cilindro con diámetro de 2.0 pulg y altura de 3 pulg se solidifica en tres minutos en una operación de fundición en arena. ¿Cuál es el tiempo de solidificación si la altura del cilindro se duplica? ¿Cuál es el tiempo si el diámetro se duplica?

10.49 Se da una constante C en la regla de Chvorinov de 2.5 s/mm^2 y se usa para producir una fundición cilíndrica con diámetro de 50 mm y altura de 125 mm. Estime el tiempo necesario para que la fundición se solidifique por completo. El molde puede romperse en forma segura cuando el cascarón solidificado es de al menos 20 mm. Si se supone que el cilindro se enfría de manera uniforme, ¿cuánto tiempo debe transpirar después de verter el metal fundido y antes de que el molde pueda romperse?

10.50 Se vierte cobre puro en un molde de arena. El nivel de metal en la copa de vaciado es de 10 pulg por encima del nivel del metal en el molde y el canal de alimentación es circular con diámetro de 0.4 pulg. ¿Cuál es la velocidad de flujo del metal en el molde? ¿El flujo es turbulento o laminar?

10.51 Para el bebedero descrito en el problema 10.58, ¿cuál debe ser el diámetro del canal de alimentación para garantizar un número de Reynolds de 2000? ¿Cuánto tiempo requerirá una fundición de 15 pulg³ para llenarse usando ese canal de alimentación?

10.52 Suponga que usted es un profesor que cubre los temas descritos en este capítulo y está aplicando un examen de los aspectos numéricos para probar la comprensión de sus alumnos. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione sus respuestas.

10.53 Cuando se diseñan modelos para fundición, los fabricantes de dichos modelos utilizan reglas especiales que incorporan automáticamente las tolerancias de contracción del sólido en sus diseños; por lo tanto, una regla de 100 mm de un fabricante de modelos mide más de 100 mm. ¿Cuánto debe medir la regla de un fabricante de modelos para fundición para (1) fundiciones de aluminio, (2) hierro fundido maleable y (3) acero con alto contenido de manganeso?

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

10.54 ¿Puede usted diseñar pruebas de fluidez distintas a las mostradas en la figura 10.9? Explique las características de sus métodos de prueba.

10.55 En la figura P10.55 se indican varios defectos y discontinuidades en los productos fundidos. Revise cada defecto y ofrezca soluciones para evitarlo.

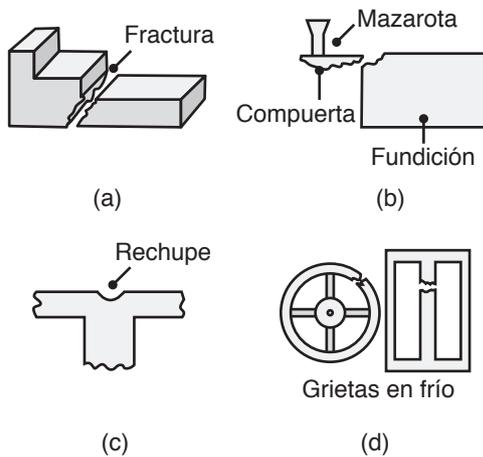


FIGURA P10.55

10.56 La prueba de fluidez mostrada en la figura 10.9 ilustra sólo el principio de esta prueba. Diseñe una preparación para tal prueba que muestre el tipo de materiales y el equipo a ser

utilizados. Explique el método por el cual usted determinaría la longitud del metal solidificado en el paso en espiral.

10.57 Utilizando el equipo y los materiales disponibles en una cocina típica, diseñe un experimento para reproducir resultados similares a los mostrados en la figura 10.11. Comente sus observaciones.

10.58 Un método para mitigar las concentraciones de esfuerzo en una pieza consiste en aplicarle una pequeña deformación plástica uniforme. Haga una lista de sus preocupaciones y recomendaciones cuando se sugiere un método semejante para una fundición.

10.59 Describa los efectos en el diseño del molde, incluyendo el cambio requerido en el tamaño de las mazarotas, los canales de alimentación, estranguladores y bebederos, para una fundición que tiene una forma dada y debe duplicar su volumen.

10.60 Con frecuencia, en una fundición persisten pequeñas cantidades de escoria después del desnatado, las cuales se introducen en el flujo del metal fundido. Si se reconoce que la escoria es mucho menos densa que el metal del molde, diseñe componentes para un molde que eliminen esas pequeñas cantidades de escoria antes de que el metal alcance la cavidad del molde.

10.61 En la figura II.2 se muestra una variedad de componentes en un automóvil típico, los cuales se producen por fundición. Piense en otros productos, como herramientas eléctricas y pequeños electrodomésticos, y prepare una ilustración similar a esta figura.

10.62 Diseñe un experimento para medir las constantes C y n en la regla de Chvorinov, ecuación (10.7). Describa las características de su diseño y comente las dificultades que pueden surgir al ejecutar ese tipo de experimento.

11.1	Introducción	256
11.2	Procesos de fundición de molde desechable y modelo permanente	260
11.3	Procesos de fundición de molde y modelo desechables	269
11.4	Procesos de fundición de molde permanente	276
11.5	Técnicas de fundición para componentes monocristalinos	284
11.6	Solidificación rápida	286
11.7	Inspección de piezas fundidas	287
11.8	Procedimientos y hornos de fusión	287
11.9	Fundidoras y automatización de fundidoras	289

CASOS DE ESTUDIO:

11.1	Fundición de espuma perdida (modelo evaporable o consumible) para monoblocks de motor	270
11.2	Componentes superaleados de turbinas de gas fundidos por revestimiento	273
11.3	Fundición por revestimiento de prótesis totales de rodilla	274
11.4	Fundición en dado de un montaje de faro	281

- En este capítulo se describen los procesos de fundición industrial con base en los fundamentos de la solidificación, el flujo de fluidos y la transferencia de calor descritos en el capítulo anterior.
- Los procesos de fundición se clasifican generalmente como procesos de molde permanente y de molde desechable; además, los procesos de molde desechable se clasifican como procesos de modelo permanente y de modelo desechable.
- Se describen las características de cada proceso junto con sus aplicaciones típicas, ventajas y limitaciones.
- Después se describen los procesos especiales de fundición que producen componentes monocristalinos tanto como aleaciones amorfas.
- El capítulo termina con una descripción de las técnicas de inspección para las piezas de fundición.

Productos típicos fabricados por fundición: monoblocks de motor, cigüeñales, carcasas de herramientas eléctricas, álabes de turbina, piezas de plomería, dientes de cremallera, dados y moldes, engranajes, ruedas de ferrocarril, hélices, equipos de oficina y estatuas. La fundición es extremadamente versátil y adecuada para una amplia variedad de productos.

Procesos alternativos: forjado, metalurgia de polvos, maquinado, prototipado y fabricación rápidos.

11.1 Introducción

Las primeras fundiciones de metal se hicieron durante el periodo comprendido entre los años 4000 y 3000 a. C., usando moldes de piedra o metal para la fundición de cobre. Con el tiempo, se han desarrollado diferentes procesos de fundición, cada uno con sus propias características y aplicaciones (vea también la figura I.5a), para cumplir con requisitos de diseño específicos (tabla 11.1). Existe una gran variedad de piezas y componentes fabricados por fundición (figura 11.1), como los monoblocks de motor, cigüeñales, componentes y motores de automóviles, maquinaria agrícola y de ferrocarriles, tuberías y accesorios de plomería, carcasas de herramientas eléctricas, cañones de pistola, sartenes, implantes ortopédicos, joyería y componentes de gran tamaño para turbinas hidráulicas.

Hay dos tendencias que han tenido un gran impacto en la industria de la fundición. La primera es la mecanización y automatización de las operaciones de fundición, lo que ha dado lugar a cambios significativos en el uso de los equipos y la mano de obra. Avanzada maquinaria y sistemas de control de procesos automatizados han sustituido a los métodos tradicionales de fundición. La segunda tendencia importante ha sido la creciente demanda de piezas de fundición de alta calidad con tolerancias dimensionales cerradas.

Este capítulo está organizado en torno a las clasificaciones principales de las prácticas de fundición (dadas en la figura II.3 de la introducción a la parte II). Estas clasificacio-

TABLA 11.1

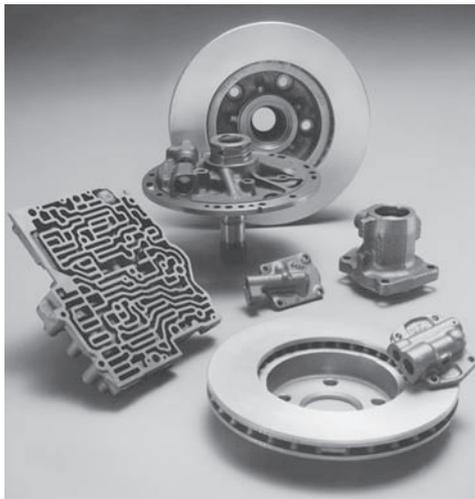
Resumen de los procesos de fundición		
Proceso	Ventajas	Limitaciones
Arena	Casi todos los metales pueden fundirse; no hay límite al tamaño, la forma o el peso de la pieza; bajo costo de las herramientas.	Requiere algunos acabados; acabado superficial relativamente burdo; tolerancias amplias.
Moldeo en cáscara	Buena precisión dimensional y acabado superficial; alta tasa de producción.	Tamaño limitado de las piezas; modelos y equipos costosos.
Patrón o modelo consumible o evaporable	La mayoría de los metales pueden fundirse; no hay límite de tamaño; piezas con formas complejas.	Los modelos tienen baja resistencia y pueden resultar costosos para cantidades bajas.
Molde de yeso	Piezas con formas intrincadas; buena precisión dimensional y buen acabado superficial; baja porosidad.	Limitado a los metales no ferrosos; tamaño de las piezas y volumen de producción limitados; tiempo de fabricación de los moldes relativamente largo.
Molde cerámico	Piezas con formas intrincadas; piezas con tolerancia cerrada; buen acabado superficial; baja velocidad de enfriamiento.	Tamaño limitado de las piezas.
Revestimiento	Piezas con formas caprichosas; excelente precisión y acabado; casi cualquier metal puede fundirse.	Tamaño limitado de las piezas; modelos, moldes y mano de obra caros.
Molde permanente	Acabado superficial y precisión dimensional buenos; baja porosidad; alta tasa de producción.	Alto costo del molde; forma y complejidad limitadas de las piezas; no es adecuado para metales con alto punto de fusión.
Dado	Excelente precisión dimensional y acabado superficial; alta tasa de producción.	Alto costo del dado; tamaño limitado de las piezas; por lo general, limitado a metales no ferrosos; largo tiempo de producción.
Centrífugo	Piezas cilíndricas o tubulares grandes con buena calidad; alta tasa de producción.	Equipos costosos; forma limitada de las piezas.

nes se relacionan con los materiales de molde, la producción de modelos, los procesos de moldeo y los métodos para el llenado del molde con metal fundido. Las categorías principales son:

1. **Moldes desechables**, hechos típicamente de arena, yeso, cerámicos y materiales similares; por lo general, son mezclados con diversos aglutinantes (*agentes de unión*) para mejorar sus propiedades. Un molde de arena común consiste en 90% de arena, 7% de arcilla y 3% de agua. Como se describe en el capítulo 8, estos materiales son *refractarios* (es decir, son capaces de soportar las altas temperaturas de los metales fundidos). Después que la fundición se ha solidificado, el molde se rompe para retirar la pieza fundida, de ahí la palabra *desechable*.

El molde se produce a partir de un modelo; en algunos procesos, y aunque el molde sea desechable, el modelo se vuelve a utilizar para producir varios moldes. Tales procesos se denominan *procesos de fundición de molde desechable* y *modelo permanente*. Por otro lado, la fundición por revestimiento requiere un modelo para cada molde producido y es ejemplo de un proceso de fundición de molde y modelo desechables.

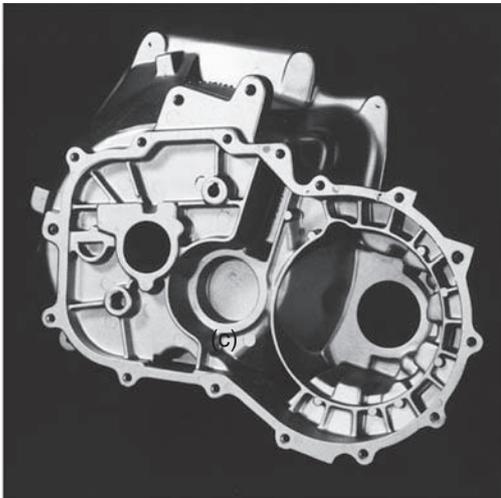
2. **Moldes permanentes**, hechos de metales que mantienen su resistencia a elevadas temperaturas. Como lo indica su nombre, estos moldes son para utilizarse repetidamente y están diseñados de modo que la pieza fundida pueda retirarse fácilmente y el molde sea usado en la siguiente colada o fundición. Los moldes metálicos (coquillas) son mejores conductores de calor que los moldes no metálicos desechables (vea la tabla 3.1); por lo tanto, la solidificación de la fundición se somete a una mayor velocidad de enfriamiento, lo que a su vez afecta la microestructura y el tamaño de grano dentro de la pieza fundida.
3. **Moldes compósitos**, hechos de dos o más materiales diferentes (como arena, grafito y metal) que combinan las ventajas de cada material. Estos moldes tienen una parte permanente y otra desechable y se utilizan en diversos procesos de fundición para mejorar la resistencia del molde, controlar la velocidad de enfriamiento y optimizar la economía general de la operación de fundición.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 11.1 (a) Fundiciones típicas de hierro gris utilizadas en automóviles, incluyendo el cuerpo de la válvula de transmisión (izquierda) y el rotor del eje con cilindro de freno de disco (frente). *Fuente:* Cortesía de la división central de fundiciones de General Motors Corporation. (b) Carcasa de magnesio fundida en dado para la cámara Olympus E-3. *Fuente:* Cortesía de Olympus Inc. (c) Caja de transmisión fundida. (d) Impulsores de aluminio fundido para turbocompresores automotrices. *Fuente:* (c) y (d) Cortesía de la American Foundry Society.

Las características generales de la fundición en arena y otros procesos de fundición se resumen en la tabla 11.2. Como puede verse, casi todos los metales comerciales pueden fundirse. El acabado superficial obtenido es, en gran parte, una función del material del molde y puede ser muy bueno, aunque, como era de esperarse, las piezas de fundición en arena generalmente tienen superficies rugosas y granuladas. Por lo común, las tolerancias dimensionales no son tan buenas como las del maquinado y otros procesos de forma neta; sin embargo, es posible hacer formas complejas, como los monoblocks de motor y las grandes hélices de los transatlánticos, por fundición.

Debido a sus características y aplicaciones únicas, sobre todo en la manufactura de dispositivos microelectrónicos (que se describen en la parte V), las técnicas básicas para el crecimiento de cristales también se incluyen en este capítulo, el cual concluye con un breve resumen de las fundidoras modernas.

TABLA 11.2

Características generales de los procesos de fundición								
	Arena	Cáscara	Modelo evaporable o consumible	Yeso	Revestimiento	Molde permanente	Dado	Centrífugo
Materiales típicos fundidos	Todos	Todos	Todos	No ferrosos (Al, Mg, Zn, Cu)	Todos	Todos	No ferrosos (Al, Mg, Zn, Cu)	Todos
Peso (kg):								
Mínimo	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.1	<0.01	0.01
Máximo	Sin límite	100+	100+	50+	100+	300	50	5000+
Acabado superficial típico (R_a en μm)	5-2.5	1-3	5-2.5	1-2	0.3-2	2-6	1-2	2-10
Porosidad ¹	3-5	4-5	3-5	4-5	5	2-3	1-3	1-2
Complejidad de forma ¹	1-2	2-3	1-2	1-2	1	2-3	3-4	3-4
Precisión dimensional ¹	3	2	3	2	1	1	1	3
Espesor de sección (mm):								
Mínimo	3	2	2	1	1	2	0.5	2
Máximo	Sin límite	—	—	—	75	50	12	100
Tolerancia dimensional típica (mm)	1.6-4 mm (0.25 mm para piezas pequeñas)	±0.003		±0.005-0.010	±0.005	±0.015	±0.001-0.005	0.015
Equipo	3-5	3	2-3	3-5	3-5	2	1	1
Modelo/dado	3-5	2-3	2-3	3-5	2-3	2	1	1
Mano de obra	1-3	3	3	1-2	1-2	3	5	5
Tiempo de espera típico ²	Días	Semanas	Semanas	Días	Semanas	Semanas	De semanas a meses	Meses
Tasa de producción típica ² (partes/molde-hora)	1-20	5-50	1-20	1-10	1-1000	5-50	2-200	1-1000
Cantidad mínima ²	1	100	500	10	10	1000	10 000	10-10 000

Notas: 1. Calificación relativa, desde 1 (la mejor) hasta 5 (la peor). Por ejemplo, la fundición en dado tiene relativamente baja porosidad, de mediana a alta complejidad de forma, alta precisión dimensional, altos costos de los equipos y dados y bajos costos de mano de obra. Estos valores son sólo de carácter general; pueden ocurrir variaciones significativas dependiendo de los métodos de fabricación utilizados.

2. Valores aproximados sin el uso de las tecnologías de prototipado rápido, la cantidad mínima cuando se aplica el prototipado rápido es de una hora.

Fuente: Datos tomados de J. A. Schey, *Introduction to Manufacturing Processes*, 3a. ed., McGraw-Hill, 2000.

11.2 Procesos de fundición de molde desechable y modelo permanente

Las principales categorías de los procesos de fundición de molde desechable y modelo permanente son las fundiciones en arena, molde de cáscara, molde de yeso, molde cerámico y al vacío.

11.2.1 Fundición en arena

El método tradicional para la fundición de metales es en moldes de arena y se ha utilizado durante miles de años. La fundición en arena sigue siendo la forma más común de fundición; sólo en Estados Unidos, se funden por este método cada año aproximadamente 15 millones de toneladas métricas de metal. Las aplicaciones típicas de la fundición en arena incluyen bases para máquinas, grandes impulsores de turbinas, hélices, accesorios de plomería y una amplia variedad de otros productos y componentes. Las capacidades de la fundición en arena se dan en la tabla 11.2.

La *fundición en arena* consiste básicamente en (a) colocar un modelo, que tiene la forma de la pieza que se va a fundir, en arena para hacer una impresión, (b) incorporar un sistema de alimentación, (c) retirar el modelo y llenar la cavidad del molde con metal fundido, (d) permitir que el metal se enfríe hasta su solidificación, (e) romper el molde de arena y (f) retirar la pieza fundida (figura 11.2).

Arenas. La mayoría de las operaciones de fundición en arena utilizan arena de sílice (SiO_2) como el material para el molde. La arena es barata y adecuada como material para el molde debido a sus características de alta temperatura y alto punto de fusión. Hay dos tipos generales de arena: **unida naturalmente** (*arena de banco*) y **sintética** (*arena de lago*). Debido a que su composición puede controlarse con mayor precisión, la arena sintética es preferida por la mayoría de las fundidoras.

Hay varios factores importantes en la selección de la arena para moldes y deben realizarse ciertas concesiones con respecto a las propiedades. La arena tiene granos finos y redondos que pueden compactarse de manera estrecha y formar así una superficie lisa para el molde. Aunque la arena de grano fino mejora la resistencia del molde, los granos finos también reducen su *permeabilidad* (donde los líquidos y gases pueden pasar a través de los poros). Una buena permeabilidad de los moldes y dados permite que los gases y vapores desprendidos durante el proceso de fundición escapen

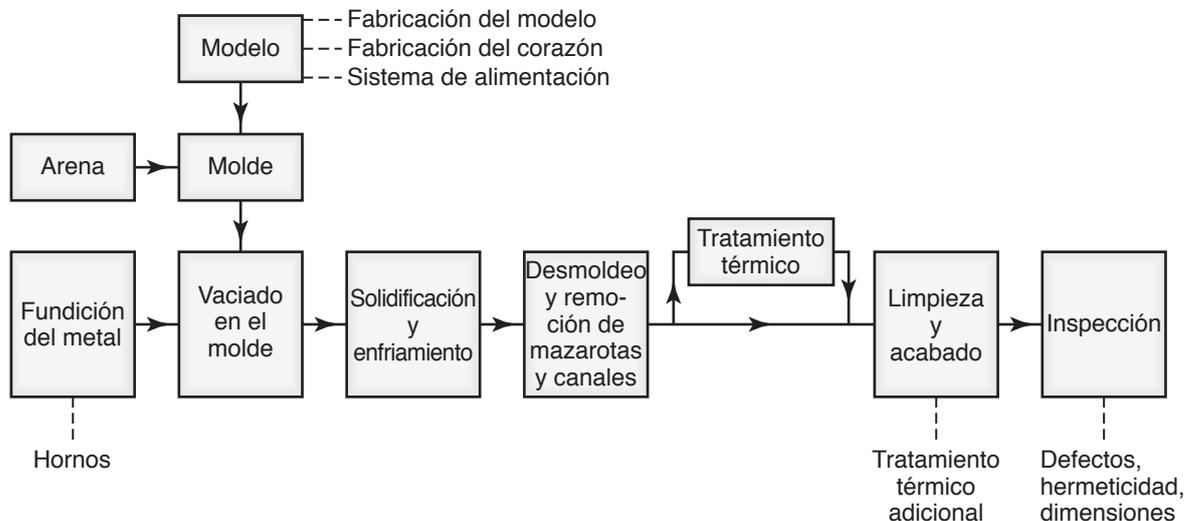


FIGURA 11.2 Esquema de las etapas de producción en una operación típica de fundición en arena.

con facilidad. El molde también debe tener una buena *colapsibilidad* para permitir que la pieza fundida se contraiga mientras se está enfriando y evitar así defectos en la pieza fundida, como el desgarramiento y el agrietamiento en caliente mostrados en la figura 10.12.

Tipos de moldes de arena. Los moldes de arena (figura 11.3) se caracterizan por el tipo de arena de que están hechos y por los métodos utilizados en su producción. Existen tres tipos básicos de moldes de arena: (a) de arena verde, (b) de caja fría y (c) no cocidos. El material de molde más común es la **arena para moldeo en verde**, una mezcla de arena, arcilla y agua. El término “verde” se refiere al hecho de que la arena está húmeda o mojada mientras el metal se vierte en el molde.

El moldeo de arena verde es el método más barato para hacer moldes y la arena se recicla fácilmente para su posterior reutilización. En el método de *película seca*, las superficies del molde se secan, ya sea almacenando el molde al aire libre o secándolo con soplete. Debido a su mayor resistencia, estos moldes se utilizan generalmente para grandes piezas de fundición.

En el proceso de **moldeo en caja fría** se mezclan diversos aglutinantes orgánicos e inorgánicos en la arena para unir los granos químicamente y lograr una mayor resistencia. Estos moldes son dimensionalmente de mayor precisión que los moldes de arena verde, pero su fabricación es más cara. En el proceso de molde no cocido, se mezcla una resina sintética líquida con la arena y la mezcla se endurece a temperatura ambiente. Debido a que en este proceso y en el de caja fría la unión del molde se lleva a cabo sin calor, se les llama **procesos de curado en frío**.

Los moldes de arena se pueden secar en hornos (*moldes horneados*) antes de vaciar el metal fundido; se vuelven más fuertes que los moldes de arena verde e imparten mayor precisión dimensional y un mejor acabado superficial a la pieza fundida. Sin embargo, este método tiene como inconvenientes que (a) la distorsión del molde es mayor; (b) las piezas fundidas son más susceptibles a la rotura en caliente, debido a la menor colapsibilidad del molde, y (c) la tasa de producción es menor porque requiere de un tiempo de secado considerable.

Las principales características de los moldes de fundición en arena son:

1. La **caja de moldeo**, que da soporte al propio molde. Los moldes de dos piezas constan de un **molde superior** y un **molde inferior**, la unión entre éstos es la *línea de partición*. Cuando se utilizan más de dos piezas en un molde de arena, las partes adicionales se denominan *cachetes*.
2. Una **copa de vaciado** o **basín**, donde se vierte el metal fundido.
3. Un **bebedero**, a través del cual fluye el metal fundido hacia abajo.
4. El **sistema de distribución o alimentación**, el cual tiene canales que transportan el metal fundido desde el bebedero hasta la cavidad del molde. Las **compuertas** son las entradas a la cavidad del molde.
5. Las **mazarotas**, las cuales suministran metal fundido adicional a la fundición ya que éste se reduce durante la solidificación. En la figura 11.3 se muestran dos tipos de mazarotas —una *mazarota ciega* y una *mazarota abierta*.
6. Los **corazones**, que son insertos hechos de arena; se colocan en el molde para formar regiones huecas o bien definir la superficie interior de la pieza fundida. Los corazones también se utilizan en el exterior de la pieza fundida para darle características de forma, como letras o numeraciones.

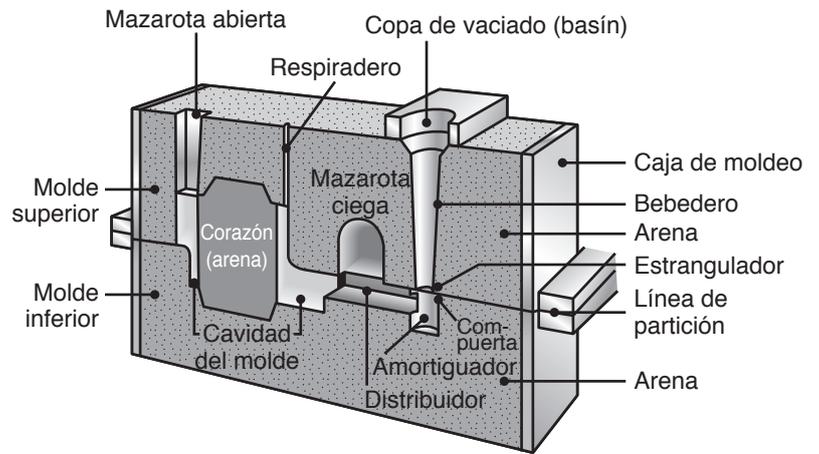


FIGURA 11.3 Ilustración esquemática de un molde de arena para mostrar diversas características.



Código QR 11.1 Producción de corazón de arena. (Fuente: Cortesía de Alcast Technologies, Ltd.).

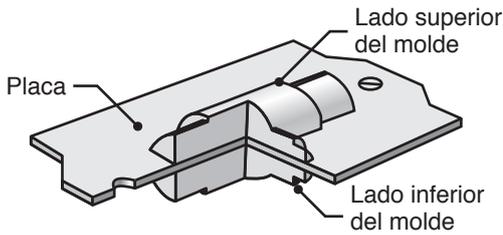


FIGURA 11.4 Modelo de placa bipartida típico usado en la fundición en arena.

7. Los **respiraderos**, que se colocan en los moldes para expulsar los gases residuales producidos cuando el metal fundido entra en contacto con la arena en el molde y el corazón. Los respiraderos también desalojan el aire de la cavidad del molde a medida que el metal fluye en el molde.

Modelos. Los *modelos* se utilizan para moldear la mezcla de arena con la forma de la pieza fundida y pueden estar hechos de madera, plástico o metal. La selección de un material para el modelo depende del tamaño y de la forma de la pieza fundida, de la precisión dimensional y de la cantidad de piezas de fundición requeridas, así como del proceso de moldeo. Dado que los modelos se utilizan repetidamente para hacer moldes, la resistencia y durabilidad del material seleccionado para un modelo deben reflejar el número de piezas de fundición que va a producir el molde. Los modelos también pueden estar hechos de una combinación de materiales para reducir el desgaste en las regiones críticas; por lo general, se recubren con un **agente separador** para facilitar la remoción del modelo de los moldes.

Los modelos pueden diseñarse con una variedad de características para aplicaciones específicas y requisitos económicos. Los **modelos de una pieza**, también llamados *modelos sueltos* o *sólidos*, se utilizan generalmente para las formas más simples y una baja cantidad de producción; a menudo son de madera y tienen bajo costo. Los **modelos divididos** son dos piezas hechas de modo que cada una forme parte de la cavidad para la fundición; de esta manera se pueden producir piezas moldeadas con formas complicadas. Los **modelos de placa bipartida** son un tipo común de modelo montado en el que se construyen modelos de dos piezas asegurando cada mitad de uno o más modelos divididos a los lados opuestos de una sola placa (figura 11.4). En tales construcciones, el sistema de alimentación se puede montar en el lado inferior del modelo. A menudo, este tipo de modelo se utiliza junto con máquinas de moldeo y para grandes corridas de producción en las que se fabrican fundiciones pequeñas.

Un desarrollo importante en la fabricación de moldes y modelos es la aplicación del **prototipado rápido** (capítulo 20). Por ejemplo, para la fundición en arena, es posible fabricar un modelo en una máquina de prototipado rápido (o prototipos rápidos) y fijarlo a una placa de soporte en una fracción del tiempo y del costo que serían necesarios para su maquinado. Existen varias técnicas de prototipado rápido con las que estas herramientas se pueden producir rápidamente. Dichas tecnologías son las más adecuadas para corridas de producción pequeñas.

El diseño del modelo es un aspecto crítico de toda la operación de fundición. El diseño debe prevenir la **contracción del metal**, permitir el flujo adecuado de metal en la cavidad del molde y que el modelo pueda retirarse fácilmente del molde de arena, por medio de un ahusamiento o ángulo de salida (figura 11.5) o alguna otra característica geométrica. (Estos temas se describen con mayor detalle en el capítulo 12).

Corazones. Para las fundiciones con cavidades o pasajes internos, como las que se encuentran en los monoblocks de motor para automóvil o los cuerpos de las válvulas, se utilizan *corazones*. Los corazones se colocan en la cavidad del molde para formar las superficies interiores de la fundición y se eliminan de la pieza acabada durante el retiro del molde y posterior procesamiento. Igual que los moldes, los corazones deben poseer resistencia, colapsibilidad, permeabilidad y capacidad para resistir el calor; por lo tanto, los corazones están hechos de agregados de arena.

El corazón se fija mediante **plantillas de corazones**, que son las características geométricas añadidas al modelo para ubicar y dar soporte al corazón, además de proporcionar respiraderos por donde escapen los gases (figura 11.6a). Un problema común con los



Código QR 11.2 Fundición en arena usando métodos de moldeo manuales. (Fuente: Cortesía de Alcast Technologies, Ltd.).

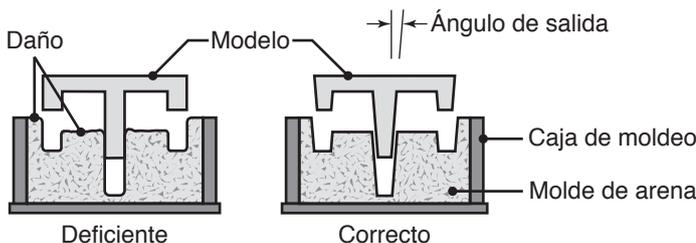


FIGURA 11.5 Ahusamiento o ángulo de salida en los modelos para facilitar la extracción del molde de arena.

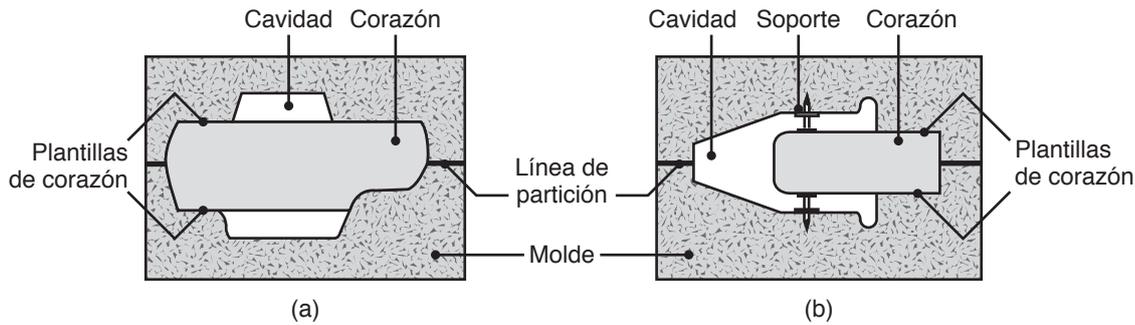


FIGURA 11.6 Ejemplos de corazones de arena mostrando plantillas de corazón y soportes para fijar los corazones.

corazones es que, para algunos requisitos de fundición tales como en el caso donde se requiere un rebaje, pueden carecer de suficiente soporte estructural en la cavidad. Para evitar que el corazón se mueva, pueden usarse anclas metálicas (**soportes**) para fijarlo en su sitio (figura 11.6b).

Los corazones suelen fabricarse de una manera similar a la utilizada en la elaboración de moldes de arena; la mayoría están hechos con procesos de cáscara (vea la sección 11.2.2), no cocidos o de caja fría. Los corazones se forman en *cajas de corazón*, las cuales se utilizan en gran medida de igual manera que los modelos para formar los moldes de arena.

Máquinas para el moldeo de arena. El método más antiguo conocido para el moldeo, que todavía se utiliza en productos fundidos sencillos y pequeñas corridas de producción, consiste en compactar la arena presionándola con la mano (apisonándola) o compactándola alrededor del modelo. Sin embargo, para la mayoría de las operaciones, la mezcla de arena se compacta alrededor del modelo mediante *máquinas de moldeo*. Estas máquinas eliminan un arduo trabajo, manipulan el molde de manera controlada, aportan alta calidad a la fundición, al mejorar la aplicación y la distribución de fuerzas, y aumentan la tasa de producción.

En el **moldeo vertical sin caja**, las mitades del modelo forman una pared de cámara vertical contra la que la arena se lanza y compacta (figura 11.7). Después, las mitades del molde se unen horizontalmente con la línea de partición orientada en forma vertical y se conducen a lo largo de un transportador de vaciado. Ésta es una operación simple y elimina la necesidad de manejar cajas de moldeo, lo que permite muy altas tasas de



Código QR 11.3 Fundición en arena utilizando métodos de moldeo automatizados. (Fuente: Cortesía de Alcast Technologies, Ltd.).

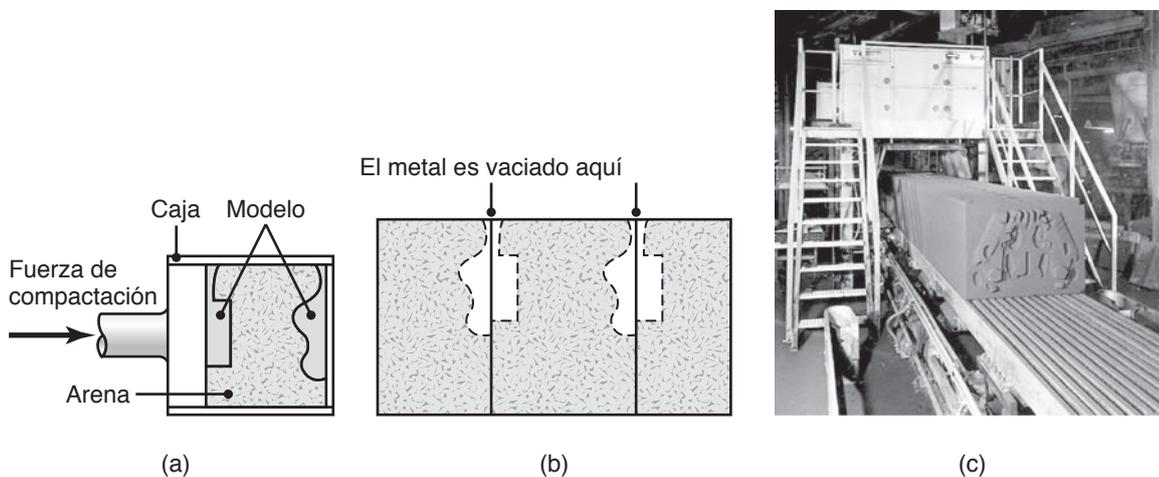


FIGURA 11.7 Moldeo vertical sin caja. (a) La arena se comprime entre las dos mitades del modelo. (b) Los moldes ensamblados pasan a lo largo de una línea de ensamble para el vaciado. (c) Fotografía de una línea de moldeo vertical sin caja. Fuente: Cortesía de la American Foundry Society.

producción; en particular cuando otros aspectos de la operación (como la extracción y el vaciado) están automatizados.

Los **lanzadores de arena** llenan de manera uniforme la caja de moldeo con arena sometida a una corriente de alta presión; se utilizan para rellenar grandes cajas de moldeo y, a menudo, están automatizados. Un impulsor de la máquina lanza arena desde sus aspas o tazones a velocidades tan altas que la máquina no sólo posiciona la arena, sino que también la compacta de manera apropiada.

En el **moldeo por impacto**, la arena se compacta mediante una explosión controlada o liberación instantánea de gases comprimidos. Este método produce moldes con resistencia uniforme y buena permeabilidad.

En el **moldeo por vacío** (también conocido como *proceso V*), el cual se muestra en la figura 11.8, el modelo se cubre herméticamente con una hoja delgada de plástico. Se coloca una caja de moldeo sobre el modelo cubierto y se rellena con arena seca sin aglutinante. Después, se coloca una segunda hoja de plástico en la parte superior de la arena y una acción de vacío la compacta; posteriormente, el modelo puede retirarse. Ambas mitades del molde se hacen de la misma forma y después se ensamblan. Durante el vaciado del metal fundido el molde se mantiene al vacío, pero no así la cavidad de la fundición. Cuando el metal se ha solidificado, el vacío se desactiva y la arena cae, liberando entonces la pieza fundida.

Como se muestra en la figura 11.8, el moldeo por vacío no requiere un ángulo de salida en la pieza y puede ser muy económico debido a los bajos costos de las herramientas, la larga vida del modelo y la ausencia de aglutinantes en la arena (lo que también simplifica su recuperación y reutilización). El moldeo por vacío produce piezas fundidas con detalles superficiales y precisión dimensional de alta calidad; es especialmente adecuado para fundiciones grandes y relativamente planas.

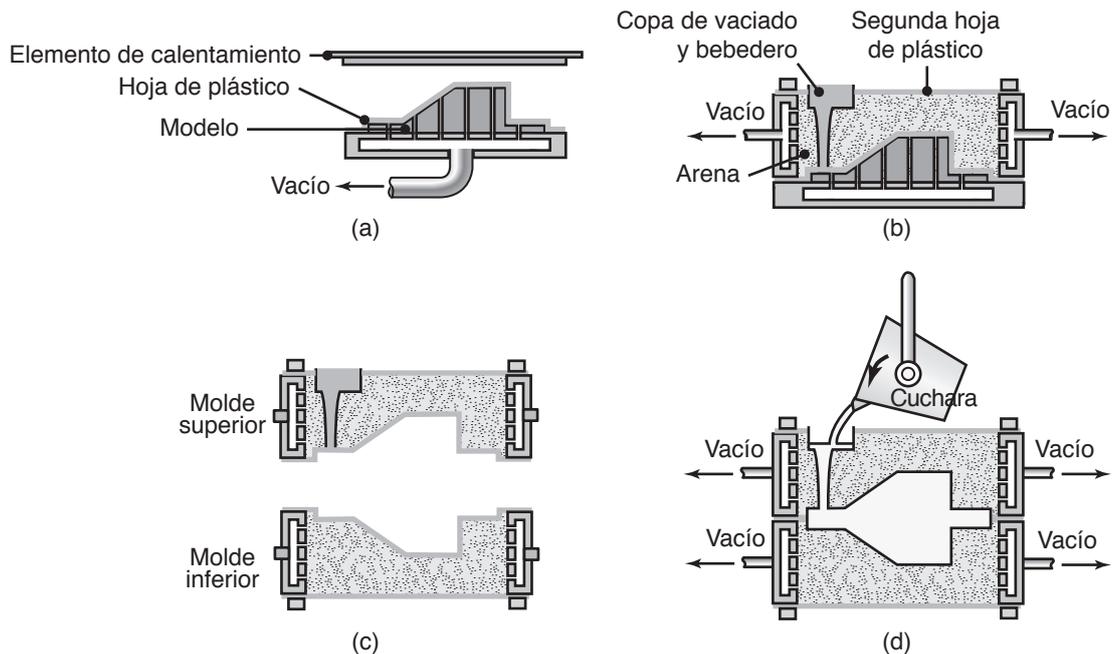


FIGURA 11.8 Proceso de moldeo por vacío. (a) Una hoja de plástico es termoforada (vea la sección 19.6) sobre un modelo; (b) una caja de moldeo por vacío se coloca sobre el modelo, se ubica un inserto de copa de vaciado y bebedero y la caja de moldeo se llena con arena. Una segunda hoja se coloca en la parte superior del molde de arena y se aplica vacío para compactar firmemente la arena contra el modelo. (c) También se produce un molde inferior, junto con los cachetes, corazones, etc., como en el moldeo en arena convencional; los moldes inferior y superior pueden transportarse con cuidado, sin aplicar vacío. (d) Después, las mitades de molde se unen, se aplica el vacío para asegurar la resistencia del molde y se vierte metal fundido en el molde.

Operación de fundición en arena. Después de que el molde se ha formado y los corazones están colocados en posición, las dos mitades del molde (superior e inferior) se cierran, se sujetan y se les aplica peso, para evitar la separación de las secciones del molde bajo la presión ejercida cuando el metal fundido se vierte en la cavidad del molde. En la figura 11.9 se muestra una secuencia completa de operaciones para la fundición en arena.

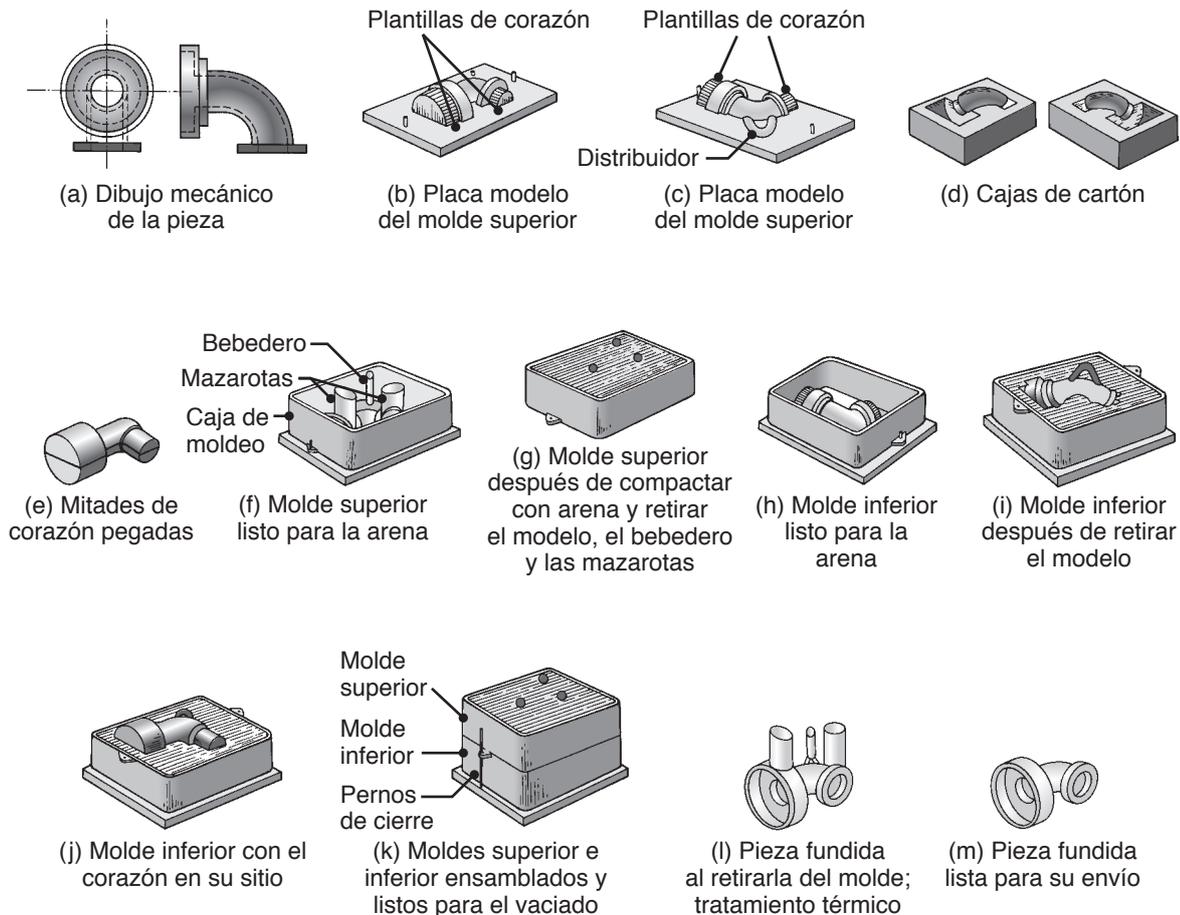


FIGURA 11.9 Ilustración esquemática de la secuencia de operaciones para la fundición en arena. (a) Se usa un dibujo mecánico de la pieza para generar un diseño del modelo. En el dibujo deben incorporarse consideraciones como la contracción y el ángulo de salida de la pieza. (b) y (c) Los modelos han sido montados sobre placas equipadas con pasadores de alineación, note la presencia de plantillas de corazones diseñadas para mantener al núcleo en su lugar. (d) y (e) Las cajas de corazón producen medios corazones que se pegan entre sí; los corazones se utilizarán para producir la zona hueca de la pieza que se muestra en (a). (f) La mitad superior del molde se ensambla asegurando la placa modelo del molde superior a la caja de moldeo con los pasadores de alineación y se añaden los insertos para formar el bebedero y las mazarotas. (g) La caja de moldeo se apisona con arena y la placa y los insertos se retiran. (h) La mitad inferior del molde se produce de una manera similar con el modelo insertado; se coloca un tablero por debajo del molde inferior y es alineado con pernos. (i) El modelo, la caja de moldeo y el tablero inferior se invierten y el modelo se retira, dejando la impresión apropiada. (j) El corazón se fija en su sitio dentro de la cavidad inferior. (k) El molde se cierra al colocar la parte superior del molde sobre la inferior y el conjunto se fija con pernos; después las cajas de moldeo se someten a presión para contrarrestar las fuerzas de flotación en el líquido, las cuales podrían levantar el molde superior. (l) Después de que el metal se solidifica la pieza fundida se retira del molde. (m) El bebedero y las mazarotas se cortan y reciclan y la pieza fundida se limpia, inspecciona y recibe tratamiento térmico (cuando es necesario). Fuente: Cortesía de la Steel Founders' Society of America.

Después de que se solidifica, la pieza fundida se extrae de su molde y se eliminan las capas de arena y óxido adheridas (mediante vibración, usando un agitador o por medio de un chorro de arena). Las piezas fundidas también se limpian mediante chorro de granalla de acero (*granallado*, sección 26.8) o arena. Mazarotas y distribuidores se cortan usando oxicorte de gas, aserrado, corte o esmeriles abrasivos; o se cortan en dados. Los distribuidores y mazarotas de acero fundido también pueden eliminarse usando pistolas de arco con electrodo de carbono con chorro de aire (sección 30.8) o sopletes. Las piezas fundidas pueden limpiarse incluso por medios electroquímicos o decapado con productos químicos para eliminar los óxidos superficiales.

Posteriormente, la pieza fundida se puede *tratar térmicamente* para mejorar ciertas propiedades necesarias para su utilización prevista; el tratamiento térmico resulta especialmente importante para las fundiciones de acero. Las *operaciones de acabado* pueden implicar maquinado, enderezado a máquina o forjado en dados (dimensionamiento) para obtener el tamaño final. La *inspección* es un paso final importante y se lleva a cabo para asegurar que la pieza fundida cumpla con todos los requisitos de diseño y control de calidad.

Moldeo con grafito apisonado. En este proceso, se usa grafito apisonado (sección 8.6) en la fabricación de moldes para fundir metales reactivos, como el titanio y el circonio. La arena no puede utilizarse debido a que estos metales reaccionan vigorosamente con la sílice. Los moldes se compactan igual que los moldes de arena, se secan al aire, se cuecen a 175 °C (350 °F), se queman a 870 °C (1600 °F) y después se almacenan en condiciones de humedad y temperatura controladas. Los procedimientos de fundición son similares a los de los moldes de arena.

Ablación del molde. La ablación se ha utilizado para mejorar las propiedades mecánicas y las tasas de producción de las fundiciones en arena. En este proceso, un molde de arena se llena de metal fundido y el molde se pulveriza inmediatamente con un líquido y/o gas solvente para erosionar progresivamente la arena. A medida que se retira el molde, la corriente de líquido causa una solidificación rápida y direccionada del metal. Con las mazarotas adecuadas, la ablación del molde da como resultado una porosidad significativamente menor que la de la fundición en arena convencional; lo anterior conduce a una mayor resistencia y ductilidad y, por lo tanto, se ha aplicado a materiales que suelen ser difíciles de fundir o a materiales compósitos de matriz metálica. Puesto que la ablación acelera la solidificación y elimina los corazones, también se pueden lograr mejoras significativas en la productividad.

11.2.2 Moldeo en cáscara

El *moldeo en cáscara*, desarrollado por primera vez en la década de 1940, ha aumentado en forma significativa; puede producir muchos tipos de fundiciones con tolerancias dimensionales cerradas, buen acabado superficial y bajo costo. Las aplicaciones de la fundición en cáscara incluyen pequeñas piezas mecánicas que requieren alta precisión, como cajas para engranes, cabezales de cilindro y bielas. El proceso también se usa ampliamente en la producción de corazones de moldeo de alta precisión. Las capacidades de fundición en molde de cáscara se dan en la tabla 11.2.

En este proceso, un modelo montado, hecho a partir de un metal ferroso o de aluminio, (a) se calienta hasta una temperatura de entre 175 y 370 °C (350 y 700 °F), (b) se recubre con un agente separador (por ejemplo, silicona) y (c) se fija a una caja o cámara. La caja contiene arena fina mezclada con un aglutinante de resina termofija (como fenol-formaldehído) en un porcentaje de entre 2.5 y 4% que cubre las partículas de arena. La caja se voltea (figura 11.10) o bien la mezcla de arena se lanza sobre el modelo, lo que permite formar un recubrimiento.

El ensamble se coloca entonces en un horno durante un corto periodo para completar el curado de la resina. En la mayoría de las máquinas de moldeo en cáscara, el horno consiste en una caja de metal con quemadores de gas que oscilan sobre el molde de cáscara para curarlo. La cáscara se endurece alrededor del modelo y se retira del modelo utilizando pernos de expulsión integrados. Se hacen dos medias cáscaras de esta manera y se unen o sellan entre sí para formar un molde.

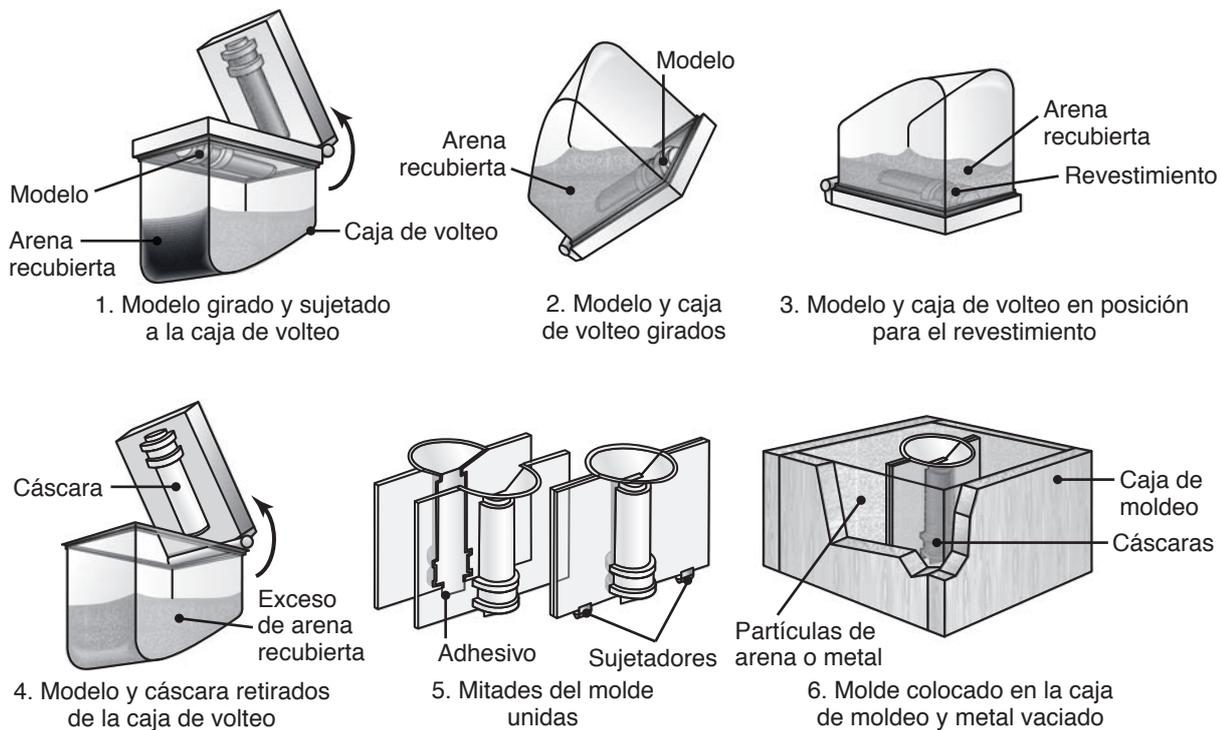


FIGURA 11.10 Proceso de moldeo en cáscara, llamado también técnica de la caja de volteo.

El espesor de la cáscara (o cascarón) puede determinarse con precisión al controlar el tiempo que el modelo está en contacto con el molde. De esta manera, la cáscara puede formarse con la resistencia y la rigidez requeridas para soportar el peso del líquido fundido. Las cáscaras son ligeras y delgadas —generalmente de entre 5 y 10 mm (0.2 y 0.4 pulg)— y, por consiguiente, sus características térmicas son diferentes a las de moldes más gruesos.

La arena utilizada para cascarón tiene un tamaño de grano mucho más pequeño y, por lo tanto, una permeabilidad más baja que la arena utilizada para el moldeo en verde. La descomposición del aglutinante para la arena de cascarón también produce un alto volumen de gas. Por consiguiente, a menos que los moldes se ventilen de manera adecuada, el aire y el gas atrapados pueden causar defectos en el moldeo en cáscara de fundiciones ferrosas. Los acabados de alta calidad de las piezas fundidas pueden reducir significativamente los costos por limpieza, maquinado y otros costos de acabado. Es posible producir formas complejas con menos mano de obra y el proceso puede automatizarse con bastante facilidad.

11.2.3 Fundición en moldes de yeso

Este proceso, y los procesos de fundición en molde cerámico y por revestimiento que se describen en las secciones 11.2.4 y 11.3.2, se conocen como **fundiciones de precisión** debido a la alta precisión dimensional y al buen acabado superficial que se obtienen al aplicarlos. Las piezas típicas que se fabrican son componentes para cerraduras, engranes, válvulas, accesorios, herramientas y adornos. Por lo general, las piezas fundidas se encuentran en el rango de entre 125 y 250 g (0.25 y 0.50 lb), aunque se han hecho piezas tan ligeras como de 1 g (0.035 oz). Las capacidades de la fundición en molde de yeso se dan en la tabla 11.2.

En el *proceso de moldeo en yeso*, el molde se hace a partir de yeso (estuco o sulfato de calcio) con adición de talco y polvo de sílice para mejorar la resistencia y controlar el tiempo requerido para que se forme el yeso. Estos componentes se mezclan con agua y la suspensión o lodo resultante se vierte sobre el modelo. Después de que el yeso se forma (por lo general en 15 minutos), el molde se retira y se seca a una temperatura de entre

120 y 260 °C (250 y 500 °F); pueden usarse temperaturas de secado más altas, dependiendo del tipo de yeso. Las mitades del molde se ensamblan para formar la cavidad y se precalientan aproximadamente a 120 °C (250 °F). Posteriormente, el metal fundido se vierte en el molde.

Debido a que los moldes de yeso tienen una permeabilidad muy baja, los gases desprendidos durante la solidificación del metal no pueden escapar; por consiguiente, el metal fundido se vierte al vacío o bajo presión. La permeabilidad del molde se puede aumentar sustancialmente con el *proceso Antioch*, en el que los moldes se deshidratan en un autoclave (horno presurizado) durante un periodo de entre 6 y 12 horas y luego se rehidratan al aire libre durante 14 horas. Otro método para aumentar la permeabilidad del molde es el uso de espuma de yeso, la cual contiene burbujas de aire atrapadas.

Por lo general, los modelos para el moldeo en yeso se hacen de aleaciones de aluminio, plásticos termofijos, latón o aleaciones de zinc. Los modelos de madera no son adecuados para la fabricación de un gran número de moldes porque entran en contacto varias veces con la suspensión de yeso a base de agua y, por lo tanto, se pandean o degradan rápidamente. Debido a que existe un límite a la temperatura máxima que el molde de yeso puede soportar (por lo general, una temperatura aproximada de 1200 °C; 2200 °F), la fundición en molde de yeso se utiliza sólo para el aluminio, magnesio, zinc y algunas aleaciones a base de cobre. Las piezas fundidas tienen un buen acabado superficial con detalles finos. Como los moldes de yeso tienen una conductividad térmica más baja que la de otros materiales para molde, las piezas fundidas se enfrían lentamente y, por lo tanto, se obtiene una estructura de grano más uniforme, con menos ondulaciones. El espesor de pared de las piezas fundidas puede ser muy delgado, de 1 a 2.5 mm (0.04 a 0.1 pulg).

11.2.4 Fundición en molde cerámico

El proceso de *fundición en molde cerámico* (también llamado *fundición de revestimiento superior e inferior*) es similar al proceso con molde de yeso, excepto que utiliza materiales de molde refractarios adecuados para la exposición a altas temperaturas. Las piezas comunes que se fabrican son impulsores, cortadores para operaciones de maquinado, dados para el maquinado de metales y moldes para la fabricación de componentes de plástico y hule. Mediante este proceso, se han fabricado piezas que pesan hasta 700 kg (1500 lb). La suspensión es una mezcla de agentes aglutinantes con zirconia de grano fino ($ZrSiO_4$), óxido de aluminio y sílice fundida, los cuales se vierten sobre un modelo (figura 11.11) previamente colocado en una caja de moldeo.

El modelo puede ser de madera o metal. Después de la solidificación, los moldes se retiran (caras cerámicas), se secan, se encienden para quemar la materia volátil y se cuecen. Los moldes se sujetan firmemente y se utilizan como moldes completamente cerámicos. En el *proceso de Shaw*, las caras cerámicas están respaldadas con arcilla refractaria (que resiste altas temperaturas) para brindar resistencia al molde. Después, las caras se ensamblan en un molde completo, listo para el vaciado.

La resistencia a las altas temperaturas de los materiales de moldeo refractarios permite que estos moldes se utilicen para la fundición de aleaciones ferrosas y otros materiales



FIGURA 11.11 Secuencia de operaciones en la fabricación de un molde cerámico. Fuente: *Metals Handbook*, Vol. 5, 8a. ed., ASM International, 1970.

de alta temperatura, aceros inoxidable y aceros para herramientas. Aunque el proceso es algo caro, las fundiciones tienen buena precisión dimensional y buen acabado superficial en una amplia gama de tamaños y formas intrincadas.

11.3 Procesos de fundición de molde y modelo desechables

Las fundiciones de *modelo evaporable* y por revestimiento se conocen también como procesos de fundición de *modelo desechable* o procesos de *molde y modelo desechables*. Son únicos en que es necesario producir un molde y un modelo para cada fundición, mientras que los modelos de los procesos descritos en la sección anterior son reutilizables. Las aplicaciones típicas incluyen pistones, monoblocks de motor, cigüeñales, componentes de frenado, colectores y bases para máquinas.

11.3.1 Fundición de modelo evaporable (proceso de espuma perdida o poliestireno expandido)

El proceso de *fundición de modelo evaporable* (EPC, por sus siglas en inglés) utiliza un modelo de poliestireno que se evapora al contacto con el metal fundido para formar una cavidad para la fundición; este proceso también se conoce como *fundición de espuma perdida* o *fundición de molde lleno* (FMC, por sus siglas en inglés). Este proceso de fundición se ha convertido en uno de los más importantes para metales ferrosos y no ferrosos, sobre todo en la industria automotriz.

En este proceso, se colocan partículas de poliestireno que contienen entre 5 y 8% de pentano (un hidrocarburo volátil), en un molde precalentado y generalmente hecho de aluminio. Es posible fabricar modelos complejos al unir varias secciones individuales del modelo utilizando adhesivo para fusión en caliente (sección 32.4.1). El polimetilmetacrilato (PMMA) y el carbonato de polialquileño también pueden usarse como materiales de modelo para las fundiciones ferrosas.

El poliestireno se expande y toma la forma de la cavidad del dado; se aplica calor adicional para fundir y unir las partículas. El dado se enfría y se abre para retirar el modelo de poliestireno. El modelo se recubre entonces con una suspensión de material refractario a base de agua, se seca y coloca en una caja de moldeo. La caja de moldeo se llenó con arena suelta y fina, la cual rodea y da soporte al modelo (figura 11.12), y puede secarse o mezclarse con agentes adhesivos para darle resistencia adicional. La arena se compacta en forma periódica sin retirar el modelo de poliestireno; después, el metal fundido se vierte en el molde. El metal fundido vaporiza el modelo y llena la cavidad del molde, sustituyendo por completo el espacio previamente ocupado por el poliestireno. Cualquier producto de la degradación del poliestireno se ventila en la arena circundante.

Debido a que el polímero requiere una considerable energía para degradarse, existen grandes gradientes térmicos en la interfase metal-polímero; en otras palabras, el metal fundido se enfría más rápido de lo que lo haría si se vaciara directamente en una cavidad vacía. Por consiguiente, la fluidez es menor que en la fundición en arena. Esto tiene efectos importantes sobre la microestructura a lo largo de la fundición y también conduce a la solidificación direccional del metal.

El proceso del modelo evaporable tiene varias ventajas sobre otros métodos de fundición:

- Es relativamente simple dado que no existen líneas de separación, corazones o sistemas de mazarotas.
- Utiliza cajas de moldeo de bajo costo.
- El poliestireno es barato y puede procesarse fácilmente en patrones con formas complejas, en diversos tamaños y con detalles superficiales finos.
- La fundición requiere operaciones de acabado y limpieza mínimos.

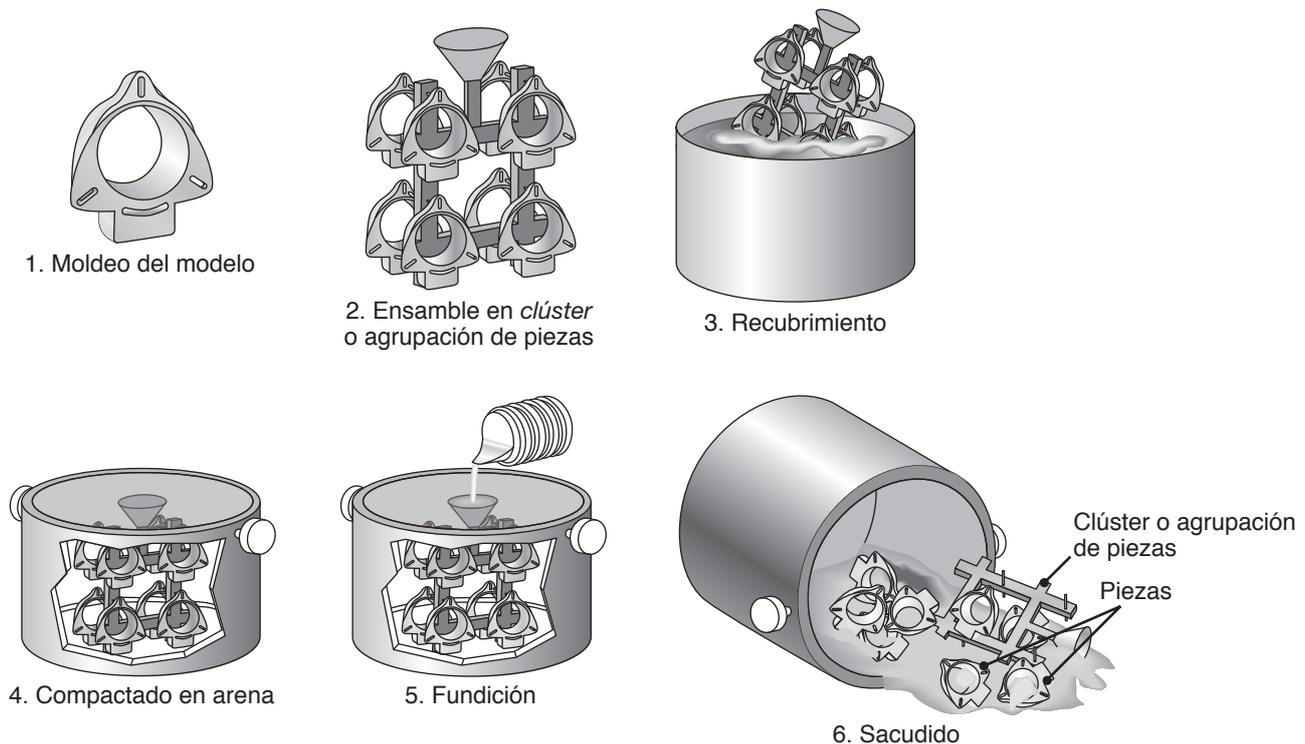


FIGURA 11.12 Ilustración esquemática del proceso de fundición de modelo desechable, también conocido como fundición de espuma perdida (poliestireno expandido) o modelo evaporable.

- El proceso puede automatizarse y resulta económico en grandes corridas de producción; sin embargo, el costo de producir el dado y la necesidad de dos conjuntos de herramientas son factores importantes.

En una modificación del proceso de modelo evaporable, llamado *proceso Replicast® C-S*, se rodea un modelo de poliestireno mediante un cascarón o cáscara de material cerámico; luego el modelo se quema antes de vaciar el metal fundido en el molde. Su principal ventaja sobre la fundición por revestimiento (que utiliza modelos de cera, sección 11.3.2) es que la captación de carbono por parte del metal se evita completamente. Otros desarrollos en la fundición de modelo evaporable incluyen la producción de compósitos de matriz metálica (secciones 9.5 y 19.14). Durante el moldeo del modelo de polímero, se le incrustan fibras o partículas que después se convierten en parte integral de la pieza fundida. Otras técnicas incluyen modificación y refinamiento del grano de la fundición mediante refinadores de grano y aleaciones maestras modificadoras.

CASO DE ESTUDIO 11.1 Fundición de espuma perdida (modelo evaporable o consumible) para monoblocks de motor

Uno de los componentes más importantes en un motor de combustión interna es el monoblock del motor. Las tendencias de la industria se han concentrado en los diseños de alta calidad, bajo costo y peso ligero. Es posible obtener beneficios económicos a través de la fundición de geometrías más complejas y la incorporación de múltiples componentes en una sola pieza.

Reconociendo que la fundición de modelo evaporable puede satisfacer simultáneamente todos estos requisitos, Mercury Castings construyó una línea de fundición de espuma pérdida (poliestireno expandido) para producir monoblocks de motor y cabezales de cilindro hechos con aluminio.

Un ejemplo de una pieza producida a través de la fundición de espuma perdida es un bloque de motor de tres cilindros de 45 kW (40 caballos de fuerza) que se utiliza para aplicaciones marinas, como el motor fuera de borda para un pequeño bote que se ilustra en la figura 11.13. El monoblock, antiguamente fabricado como ocho fundiciones independientes, se convirtió en una sola fundición de 10 kg (22 lb), con ahorros en peso y costos de 1 kg (2 lb) y \$25 dólares estadounidenses, respectivamente, por bloque. La fundición de espuma perdida también permitió la consolidación del cabezal del cilindro del motor y de los sistemas de escape y enfriamiento instalados en el monoblock; eliminando así las operaciones de maquinado asociadas y los elementos de sujeción necesarios en los diseños de fundición en arena o en dado. Además, como el modelo contenía orificios que podían fundirse de no usar corazones, se eliminaron numerosas operaciones de perforado.

Mercury Marine también estuvo involucrada en el desarrollo de un nuevo motor V6 que utiliza una nueva aleación de aluminio resistente a la corrosión y con mayor resistencia al desgaste. Este diseño de motor también requería un monoblock de cilindros y la integración de cabezales, con secciones huecas para el enfriamiento por camisa de agua, que no podrían fabricarse con los procesos de fundición en dado o de molde

semipermanente (utilizados para sus otros monoblocks V6). Con base en el éxito obtenido por la fundidora con el monoblock de tres cilindros por espuma perdida, los ingenieros aplicaron este proceso para fundir el monoblock V6 (figura 11.13b). El nuevo monoblock de motor implica sólo una colada y es más ligero y menos costoso que los diseños anteriores. Producido con un cabezal de cilindro y los sistemas de escape y enfriamiento integrados, este componente se funde en hueco para desarrollar un enfriamiento del motor por camisa de agua más eficiente durante su operación.

La compañía también desarrolló un proceso de espuma perdida a presión. Primero, se hace un modelo de espuma en una caja de moldeo y se rodea con arena. Después, la caja de moldeo se introduce en un recipiente a presión donde un robot vierte aluminio fundido sobre el modelo de poliestireno. Se cierra una tapa sobre el recipiente presurizado y se aplica una presión de 1 MPa (150 psi) a la fundición hasta que ésta se solidifica en, aproximadamente, 15 minutos. El resultado es una pieza de fundición con mejor precisión dimensional, baja porosidad y resistencia mejorada, en comparación con la fundición de espuma perdida convencional.

Fuente: Cortesía de Mercury Marine.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 11.13 (a) Metal vaciado en un molde para la fundición por espuma perdida de un motor marino de tres cilindros y 40 caballos de fuerza; (b) monoblock del motor terminado y (c) motor fuera de borda terminado. *Fuente:* Mercury Marine.

11.3.2 Fundición por revestimiento

El proceso de *fundición por revestimiento*, llamado también **proceso a la cera perdida**, se utilizó por primera vez en el periodo comprendido entre los años 4000 y 3000 a. C. Las piezas típicas resultantes son componentes para equipos de oficina y mecánicas como engranes, levas, válvulas y matracas. Con este proceso se han fundido exitosamente piezas de hasta 1.5 m (60 pulg) de diámetro que pesan hasta 1140 kg (2500 lb). Las capacidades de la fundición por revestimiento se muestran en la tabla 11.2.

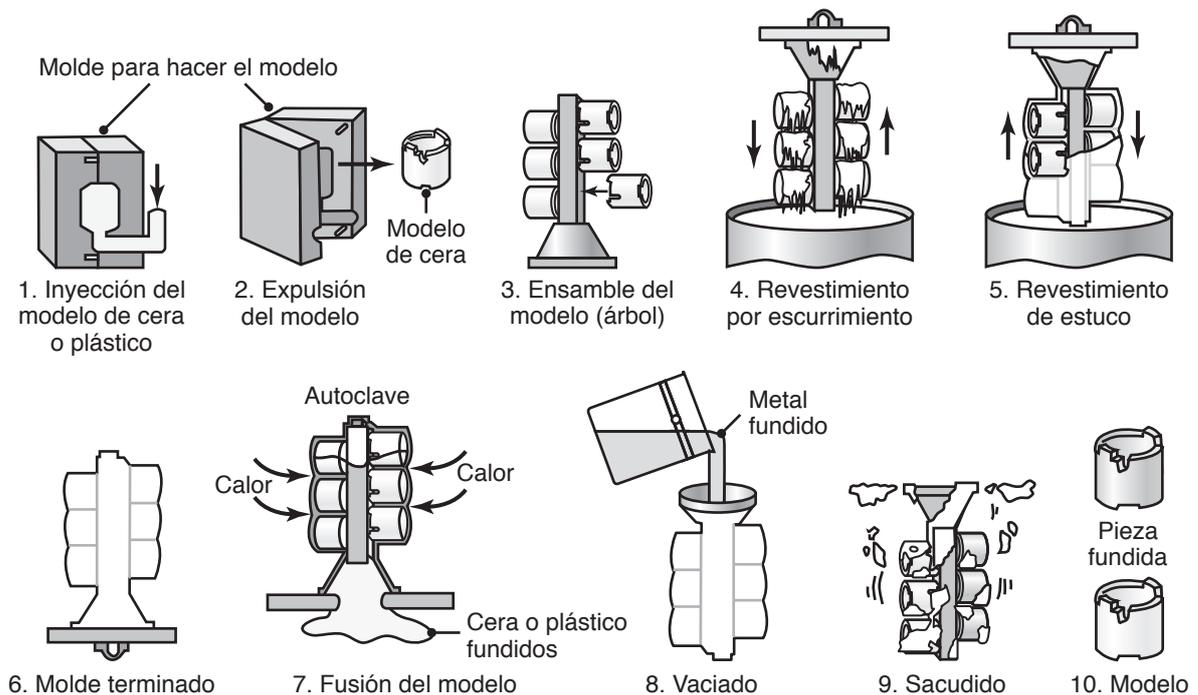


FIGURA 11.14 Ilustración esquemática del proceso de fundición por revestimiento (cera perdida). Las piezas fundidas producidas por este método pueden hacerse con detalles muy finos y usando una variedad de metales. *Fuente:* Cortesía de la Steel Founder's Society of America.

La secuencia que implica la fundición por revestimiento se muestra en la figura 11.14. Se fabrica el modelo con cera, o un plástico como el poliestireno, mediante técnicas de moldeo o prototipado rápido (capítulo 20). Después se sumerge en una suspensión de material refractario, como sílice muy fina y aglutinantes, incluyendo agua, silicato de etilo y ácidos. Después de que este revestimiento inicial se seca, el modelo se reviste varias veces para aumentar su espesor y lograr mayor resistencia. Note que para el recubrimiento inicial pueden utilizarse partículas más pequeñas a fin de desarrollar un mejor acabado superficial en la pieza fundida; en las capas posteriores pueden usarse partículas más grandes, las cuales tienen la finalidad de aumentar el espesor del recubrimiento rápidamente.

El término *revestimiento* se deriva del hecho de que el modelo se reviste (recubre) con el material refractario. Los modelos de cera requieren un manejo cuidadoso porque no son lo suficientemente resistentes como para soportar las fuerzas encontradas durante la fabricación del molde, a diferencia de los modelos de plástico; sin embargo, la cera puede recuperarse y reutilizarse.

El molde de una sola pieza se seca al aire libre y se calienta a una temperatura de entre 90 y 175 °C (200 y 375 °F); se mantiene en posición invertida durante pocas horas para fundir la cera. Después, el molde se quema a una temperatura de entre 650 y 1050 °C (1200 y 1900 °F), durante cuatro horas aproximadamente (dependiendo del metal a fundir), para eliminar el agua de cristalización (agua combinada químicamente) y quemar la cera residual. Luego que el metal se ha vaciado y solidificado, el molde se rompe y se retira la pieza fundida.

Es posible unir cierta cantidad de modelos para hacer un molde, llamado árbol (figura 11.14), aumentando significativamente la tasa de producción. Para piezas pequeñas, el árbol puede insertarse en una caja de moldeo permeable y llena de una suspensión líquida de revestimiento, el cual se coloca después en una cámara y se extrae (para eliminar las burbujas de aire) hasta la solidificación del molde. Por lo general, la caja de moldeo



Código QR 11.4 Fundición de esculturas por revestimiento. (*Fuente:* Cortesía de National Sculpture Society).

se coloca en una máquina de fundición al vacío, de modo que el metal fundido se introduce en el molde permeable para producir detalles finos.

Aunque los materiales del molde y la mano de obra involucrados hacen que el proceso de cera perdida sea costoso, resulta muy adecuado para la fundición de aleaciones de alto punto de fusión, con un buen acabado superficial y tolerancias dimensionales cerradas. Se requieren pocas o ninguna operación de acabado que de otro modo aumentarían considerablemente el costo de fundición. El proceso es capaz de producir formas complejas a partir de una amplia variedad de metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas, con piezas que pesan desde 1 g hasta 35 kg (de 0.035 oz a 75 lb). Los avances registrados incluyen la fundición de titanio para motores de avión y componentes estructurales del fuselaje, con espesores de pared del orden de 1.5 mm (0.060 pulg), los cuales compiten con las estructuras de hoja metálica utilizadas con anterioridad.

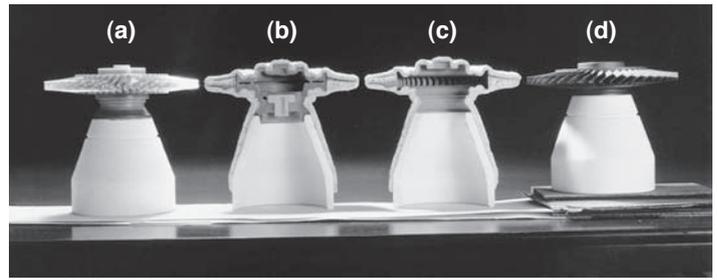


FIGURA 11.15 Fundición por revestimiento de un rotor fundido integralmente para una turbina de gas. (a) Ensamble del modelo de cera. (b) Cascarón cerámico alrededor del modelo de cera. (c) La cera se funde y el molde se llena, al vacío, con una superaleación fundida. (d) Rotor fundido producido en forma neta o casi neta. *Fuente:* Cortesía de Howmet Corporation.

Fundición por revestimiento con cáscara cerámica. Una variación del proceso de fundición por revestimiento es la *fundición con cáscara cerámica*. Se utiliza el mismo tipo de modelo de cera o plástico, el cual se sumerge primero en gel de silicato de etilo y posteriormente en una cama fluida (vea la sección 4.12) de sílice fundida con grano fino o polvo de zirconia. Después, el modelo se sumerge en sílice de grano más grueso para construir recubrimientos adicionales y desarrollar un espesor adecuado para que el modelo pueda resistir el choque térmico durante el vaciado. El resto del procedimiento es similar a la fundición por revestimiento. El proceso es económico y se utiliza extensamente para la fundición de precisión de aceros y aleaciones de alta temperatura.

La secuencia de operaciones que interviene en la fabricación de un disco de turbina mediante este método se muestra en la figura 11.15. Si en la fundición se utilizan corazones cerámicos, se eliminan por lixiviación con soluciones cáusticas bajo alta presión y alta temperatura. El metal fundido puede vaciarse al vacío para extraer los gases desprendidos y reducir la oxidación, mejorando así la calidad de la pieza fundida. Para reducir aún más la microporosidad, las piezas fundidas fabricadas mediante este y otros procesos se someten a un prensado isostático en caliente.

CASO DE ESTUDIO 11.2 Componentes superaleados de turbinas de gas fundidos por revestimiento

Las superaleaciones fundidas por revestimiento han ido reemplazando a sus contrapartes forjadas en las turbinas de gas de alto rendimiento desde la década de 1960. En la mitad superior de la figura 11.16 se muestra la microestructura de un rotor de turbina de gas integralmente fundido por revestimiento; observe los granos finos equiaxiales y uniformes en toda la sección transversal del rotor. Los procedimientos de fundición incluyen el uso de una adición nucleante al metal fundido, así como un control estricto de su supercalentamiento, de las técnicas de vaciado y de la velocidad de enfriamiento de la pieza fundida (vea la sección 10.2).

En contraste, note la estructura de grano grueso en la mitad inferior de la figura, que muestra el mismo tipo de rotor fundido convencionalmente; este rotor tiene propiedades inferiores en comparación con el rotor de grano fino. Debido a la evolución registrada en estos procesos, la proporción de piezas fundidas sobre las piezas de otro tipo en los motores de avión se ha incrementado de 20% a aproximadamente 45% de acuerdo con su peso.

(continúa)

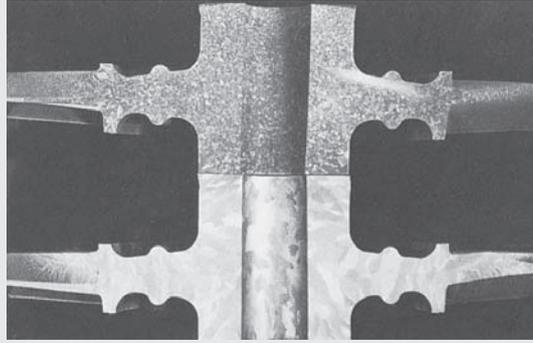


FIGURA 11.16 Sección transversal y microestructura de dos rotores: (arriba) fundido por revestimiento; (abajo) fundido convencionalmente. *Fuente:* Cortesía de ASM International.

CASO DE ESTUDIO 11.3 Fundición por revestimiento de prótesis totales de rodilla

Importantes avances en el campo de la atención médica registrados en las últimas décadas han hecho que las expectativas de vida aumenten de manera significativa, pero también han ocasionado que las expectativas de calidad de vida se mantengan altas en los últimos años. Una de las razones de las mejoras vistas en los últimos 40 años ha sido el gran éxito de los implantes ortopédicos. Los implantes de cadera, rodilla, hombro, columna vertebral y otros se han traducido en un aumento de la actividad y una reducción del dolor para millones de personas en todo el mundo.

Un ejemplo de un implante ortopédico que ha mejorado en gran medida la calidad de vida es la *prótesis total de rodilla* (TKR, por sus siglas en inglés), como la que muestra la figura 11.17a. Las TKR son muy populares y confiables para el alivio de la osteoartritis, una enfermedad degenerativa crónica y dolorosa de la articulación de la rodilla que por lo general se presenta después de la edad mediana. Las TKR constan de múltiples piezas, incluyendo componentes femorales, tibiales y rotulianos. Los materiales típicos utilizados incluyen aleaciones de cobalto, aleaciones de titanio y polietileno de ultraalto peso molecular (UHMWPE, por sus siglas en inglés, sección 7.6). Cada material se elige según las propiedades específicas que son importantes en la aplicación del implante.

Este caso de estudio describe la fundición por revestimiento de los componentes femorales de prótesis totales de rodilla que se producen a partir de una aleación de cobalto y cromo (sección 6.6). El proceso de fabricación comienza con el moldeo por inyección de los modelos, que luego se montan manualmente en árboles como se muestra en la figura 11.17b. Los modelos se espacian correctamente en un bebedero central de cera, luego se sueldan en su lugar sumergiéndolos en cera fundida y presionándolos contra el bebedero hasta que se mantienen en su sitio. En la fi-

gura 11.18a se muestra el árbol ensamblado final, el cual contiene 12 implantes de rodilla dispuestos en cuatro filas.

Los árboles terminados se colocan entonces en un estante, donde se forman en fila y después son tomados por un robot industrial (sección 37.6). El robot sigue una secuencia establecida para la construcción del molde. Primero, sumerge el modelo en una suspensión diluida y luego lo gira debajo de un tamizado de partículas finas. A continuación, el robot mueve el árbol debajo de un ventilador para secar rápidamente la capa del cerámico y luego el ciclo se repite. Después de unos pocos ciclos de dicha exposición a la suspensión diluida y las partículas finas, los detalles de los modelos se producen de manera correcta y se garantiza un buen acabado superficial. A continuación, el robot sumerge el modelo en una pasta espesa que constituye rápidamente el espesor del molde (figura 11.18c). Enseguida, los árboles se secan y colocan en un horno para fundir y quemar la cera. Posteriormente, se colocan en otro horno para precalentarlos en preparación para el proceso de fundición.

Un molde listo para la fundición por revestimiento se coloca en una máquina de fundición. El molde se coloca boca abajo sobre la máquina, directamente sobre un volumen medido de cobalto-cromo fundido. Luego, la máquina gira de modo que el metal fluya hacia el molde, como se muestra en la figura 11.17d. A continuación, el árbol se deja enfriar y el molde se retira. Las piezas fundidas se mecanizan en el árbol y se maquinan y pulen hasta las tolerancias dimensionales y el acabado superficial requeridos. En la figura 11.18 se muestra la progresión de la fundición por revestimiento, desde el árbol hasta el revestimiento y la fundición. Finalmente, las piezas se retiran del árbol y se someten a las operaciones de acabado.

Fuente: Cortesía de M. Hawkins, Zimmer, Inc.

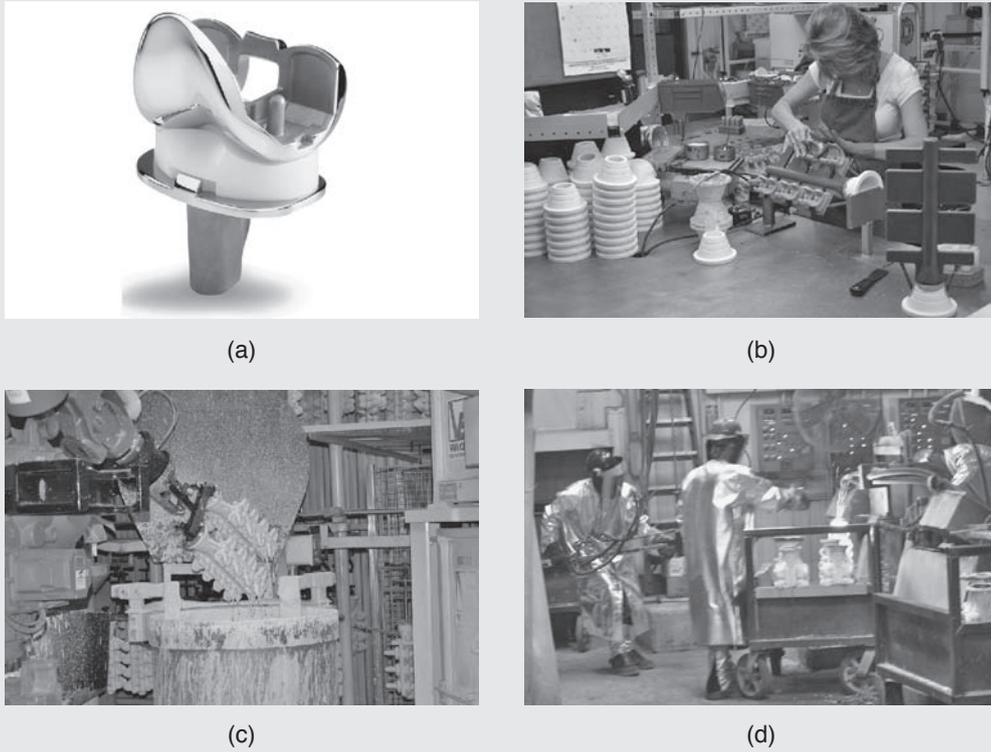


FIGURA 11.17 Manufactura de prótesis totales de rodilla. (a) Soporte de rodilla móvil (MBK, por sus siglas en inglés) NexGen Zimmer; la parte femoral de la prótesis total de rodilla es el objeto de este caso de estudio. (b) Ensamble de los modelos en un árbol central. (c) Inmersión del árbol en una suspensión para desarrollar un molde a partir del revestimiento. (d) Vaciado del metal en un molde. *Fuente:* Cortesía de M. Hawkins, Zimmer, Inc.

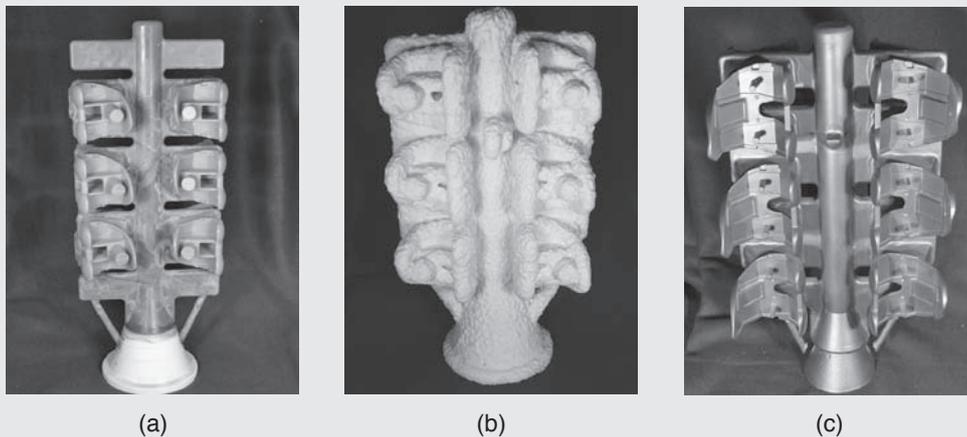


FIGURA 11.18 Progresión del árbol. (a) Después del ensamble de los modelos en el árbol; (b) después del revestimiento; (c) después de retirar el molde. *Fuente:* Cortesía de M. Hawkins, Zimmer, Inc.

11.4 Procesos de fundición de molde permanente

Los procesos de fundición de molde permanente tienen ciertas ventajas sobre otros procesos de fundición, como se describe en esta sección.

11.4.1 Fundición de molde permanente

En la fundición de *molde permanente* (llamada también *fundición en molde duro*), se hacen dos mitades de un molde con materiales de alta resistencia a la erosión y a la fatiga térmica, como hierro fundido, acero, bronce, grafito o aleaciones metálicas refractarias. Las piezas comunes que se fabrican son pistones para automóvil, cabezas de cilindro, bielas, engranajes para electrodomésticos y utensilios de cocina. Las piezas que pueden fabricarse en forma económica suelen pesar menos de 25 kg (55 lb), aunque hay fundiciones especiales con un peso de algunos cientos de kilogramos que se han realizado utilizando este proceso. Las capacidades de la fundición de molde permanente se proporcionan en la tabla 11.2.

La cavidad del molde y el sistema de alimentación se mecanizan en el molde y, por lo tanto, se convierten en parte integral del mismo. Para producir fundiciones con cavidades internas, se colocan corazones de metal o agregados de arena en el molde antes de la colada. Los materiales básicos típicos son arena aglutinada con aceite o resina, yeso, grafito, hierro gris, acero al bajo carbono y acero fabricado en dados para trabajo en caliente. El hierro gris se utiliza frecuentemente y, en particular, para los grandes moldes utilizados en la fundición de aluminio y magnesio. También se usan insertos en diversas ubicaciones del molde.

Con el fin de incrementar la vida de los moldes permanentes, las superficies de las cavidades del molde se cubren generalmente con una suspensión de material refractario como silicato de sodio y arcilla o se rocían con grafito cada cierta cantidad de fundiciones. Estos recubrimientos también sirven como agentes separadores y barreras térmicas, controlando así la velocidad de enfriamiento de la pieza fundida. Pueden requerirse eyectores mecánicos (por ejemplo, pasadores ubicados en diversas partes del molde) para el retiro de piezas complejas. Por lo general, los eyectores dejan pequeñas impresiones redondas que no suelen ser significativas.

Los moldes se sujetan entre sí por medios mecánicos y se calientan a temperaturas de entre 150 y 200 °C (300 y 400 °F) para facilitar el flujo de metal y reducir el daño térmico a los dados. Enseguida, el metal fundido se vacía a través del sistema de alimentación. Después de la solidificación, los moldes se abren y se retira la pieza fundida. Con frecuencia, el molde incorpora características de enfriamiento especiales, como un medio para el bombeo de agua que enfriará a través de canales situados en el molde o el uso de álabes de enfriamiento. Aunque la operación de fundición en molde permanente puede realizarse de modo manual, a menudo se automatiza para las corridas de producción grandes.

El proceso se utiliza sobre todo para el aluminio, el magnesio y las aleaciones de cobre, así como para la fundición gris, debido a sus puntos de fusión generalmente más bajos, aunque los aceros también pueden fundirse utilizando moldes de grafito o metal resistentes al calor. La fundición en molde permanente produce piezas con buen acabado superficial, tolerancias dimensionales estrechas, buenas propiedades mecánicas uniformes y altas tasas de producción.

Aunque los costos de los equipos pueden ser altos, debido a los altos costos de los dados, los costos de la mano de obra se mantienen bajos gracias a la automatización. El proceso no es económico para realizar corridas de producción pequeñas y no resulta adecuado para formas caprichosas, debido a la dificultad que presenta el retiro de la fundición del molde. Sin embargo, pueden usarse corazones de arena fácilmente colapsables (en un proceso llamado **fundición en molde semipermanente**), los cuales se retiran de las fundiciones y dejan huecos interiores intrincados.

11.4.2 Fundición al vacío

En la figura 11.19 se muestra una ilustración esquemática del proceso de *fundición al vacío*, también llamado *proceso de contragravedad de baja presión* (CL, por sus siglas

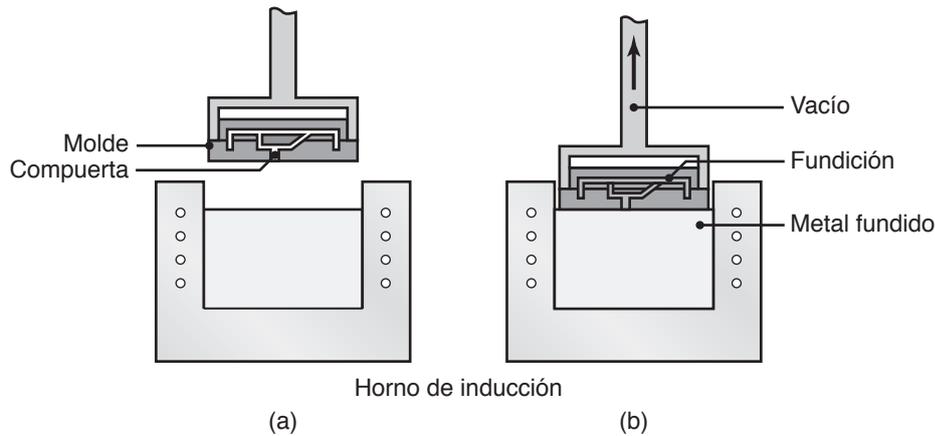


FIGURA 11.19 Ilustración esquemática del proceso de fundición al vacío; observe que el molde tiene una compuerta inferior. (a) Antes y (b) después de la inmersión del molde en el metal fundido. Fuente: Según R. Blackburn.

en inglés) (no debe confundirse con el proceso de moldeo por vacío descrito en la sección 11.2.1). La fundición al vacío es una alternativa al revestimiento, al moldeo de cáscara y a la fundición de arena verde y resulta adecuado, sobre todo, para las formas complejas con paredes delgadas y propiedades uniformes. Entre las piezas comunes que se fabrican están los componentes superaleados para turbinas de gas, con paredes que llegan a ser tan delgadas como 0.5 mm (0.02 pulg).

En este proceso, una mezcla de arena fina y uretano se moldea en dados metálicos (coquillas) y se cura con vapor de amina. Después, el molde se sostiene mediante un brazo robótico y se sumerge parcialmente en metal fundido que se encuentra en un horno de inducción. El metal puede fundirse al aire (*proceso CLA*, del inglés *Counter gravity Low pressure in Air*) o al vacío (*proceso CLV*, del inglés *Counter gravity Low pressure in Vacuum*). El vacío reduce la presión del aire en el interior del molde a casi dos tercios de la presión atmosférica, con lo que el metal fundido se introduce en las cavidades del molde a través de un canal de alimentación (compuerta) ubicado en la parte inferior del molde. En el horno, el metal se encuentra generalmente a una temperatura de 55 °C (100 °F) por encima de la temperatura del líquido de la aleación y, en consecuencia, comienza a solidificarse en un tiempo muy corto.

El proceso puede automatizarse, con costos de producción semejantes a los de la fundición en arena verde. Aplicando este método de fundición al vacío, se han fundido aleaciones de acero al bajo y alto carbono y piezas de acero inoxidable con un peso de hasta 70 kg (155 lb). Las fundiciones CLA se hacen fácilmente a un volumen alto y costo relativamente bajo y las piezas CLV, por lo general, involucran metales reactivos como aluminio, titanio, circonio y hafnio.

11.4.3 Fundición hueca por escurrimiento

En la figura 10.11 se observó que en una fundición se desarrolla una piel solidificada, la cual se hace más gruesa con el tiempo. Con base en este principio, pueden hacerse fundiciones huecas de pared delgada por fundición en molde permanente, en un proceso llamado *fundición hueca por escurrimiento*. El metal fundido se vacía en el molde de metal. Después de que se obtiene el espesor deseado de la piel solidificada, el molde se invierte (o se cuelga) y se vacía el metal líquido restante. Luego se abren las mitades del molde y se retira la fundición. Observemos que esta operación es similar a hacer formas huecas o huevos de chocolate y otros productos de confitería. La fundición en hueco es adecuada para corridas de producción pequeñas y se utiliza generalmente en la fabricación de objetos ornamentales o decorativos (como bases y pies de lámpara) y juguetes a partir de metales con bajo punto de fusión como el zinc, el estaño y aleaciones de plomo.

11.4.4 Fundición a presión

En los dos procesos de molde permanente ya descritos, el metal fundido fluye en la cavidad del molde por gravedad. En la *fundición a presión* (también llamada *vaciado a presión* o *fundición a baja presión*), el metal fundido es forzado por la presión de un gas a entrar en un molde de grafito o de metal. La presión se mantiene hasta que el metal se haya solidificado completamente en el molde. El metal fundido también puede forzarse mediante un vacío, lo que también elimina los gases disueltos y produce una pieza fundida con menor porosidad. La fundición a presión se utiliza generalmente para fundición de alta calidad, como las ruedas de acero de los carros de ferrocarril, aunque estas ruedas también pueden fundirse en moldes de arena o en moldes semipermanentes de grafito y arena.

11.4.5 Fundición en dado

El proceso de *fundición en dado* (también conocido como inyección de metales), desarrollado a inicios del siglo xx, es un ejemplo más de la *fundición de molde permanente*. El término europeo empleado para nombrar este proceso es fundición a presión en dado, pero no debe confundirse con la fundición a presión descrita anteriormente. Las piezas comunes que se fabrican por fundición en dado son carcasas para componentes de transmisiones, máquinas y aparatos para oficina, componentes de herramientas manuales y juguetes. Por lo general, el peso de la mayoría de las fundiciones varía desde menos de 90 g (3 oz) hasta alrededor de 25 kg (55 lb). Los costos de los equipos, sobre todo los dados, son un poco altos; pero los costos de mano de obra son bajos debido a que el proceso es parcial o totalmente automático. La fundición en dado es económica en grandes corridas de producción. Las capacidades de la fundición en dado se dan en la tabla 11.2.

En el proceso de fundición en dado, el metal fundido es forzado a entrar en la cavidad del molde con presiones que van desde 0.7 hasta 700 MPa (de 0.1 a 100 ksi). Existen dos tipos básicos de máquinas de fundición en dado: *cámara caliente* y *cámara fría*.

El **proceso de cámara caliente** (figura 11.20) implica el uso de un pistón, el cual obliga a un volumen específico de metal fundido a entrar en la cavidad del dado a través de un cuello de ganso y una boquilla. Las presiones llegan a ser de hasta 35 MPa (5000 psi), con un promedio aproximado de 15 MPa (2000 psi). El metal se mantiene bajo presión hasta que se solidifica en el molde. Para mejorar la vida del dado y ayudar al enfriamiento rápido del metal (lo que reduce el tiempo de ciclo), los dados suelen enfriarse con agua o aceite en circulación a través de varios conductos ubicados en el monoblock del dado. Aleaciones de bajo punto de fusión (como las aleaciones de zinc, magnesio, estaño y plomo) suelen fundirse usando este proceso. Por lo general, los tiempos de ciclo para el zinc van de 200 a 300 disparos (inyecciones individuales) por hora, aunque los componentes muy pequeños, como los dientes de una cremallera, pueden fundirse a una velocidad de 18 000 disparos por hora.

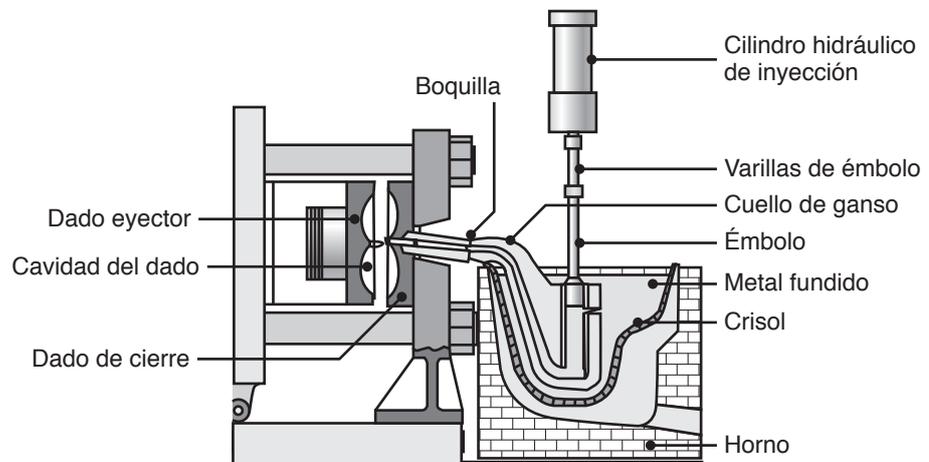


FIGURA 11.20 Representación esquemática del proceso de fundición en dado en cámara caliente.

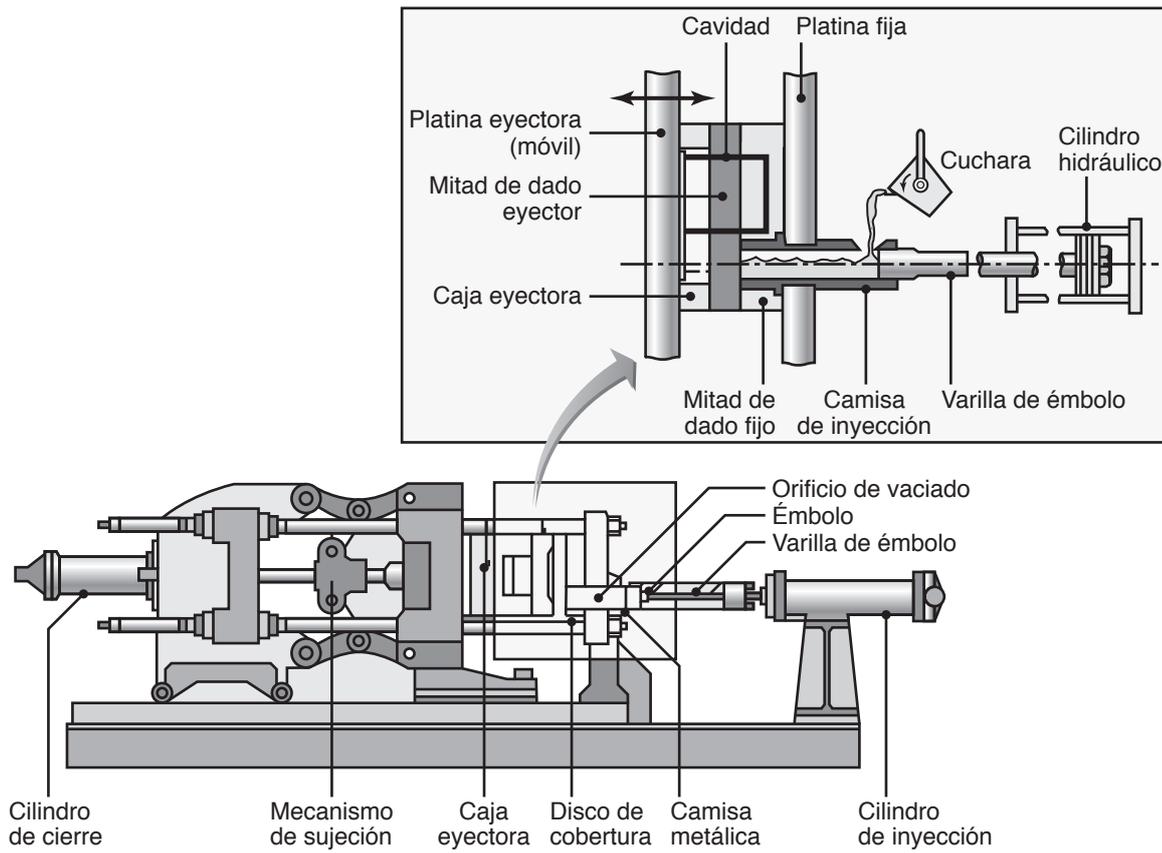


FIGURA 11.21 Ilustración esquemática del proceso de fundición en dado en cámara fría. Estas máquinas son grandes en comparación con el tamaño de la fundición debido a las grandes fuerzas requeridas para mantener las dos mitades de los moldes cerradas bajo presión durante la colada.

En el proceso de cámara fría (figura 11.21), el metal fundido se vacía en el cilindro de inyección (*cámara de disparo*). La cámara no se calienta, de ahí el término *cámara fría*. El metal es forzado a entrar en la cavidad del molde bajo presiones que normalmente están en el rango de 20 a 70 MPa (3 a 10 ksi), aunque pueden llegar a ser de hasta 150 MPa (20 ksi).

Las máquinas pueden ser horizontales (como se muestra en la figura) o verticales, en cuyo caso la cámara de disparo o de inyección es vertical. Normalmente, aleaciones con alto punto de fusión como las de aluminio, magnesio y cobre se funden utilizando este método, aunque también pueden fundirse metales ferrosos y otros metales. Las temperaturas del metal fundido comienzan aproximadamente en los 600 °C (1150 °F) para el aluminio y algunas aleaciones de magnesio y aumentan considerablemente para aleaciones a base de cobre y hierro.

Capacidades del proceso y selección de máquinas. La fundición en dado tiene la capacidad de producir rápidamente piezas de alta calidad con formas complejas, en especial con aluminio, latón, magnesio y zinc (tabla 11.3). También produce una buena precisión dimensional y buenos detalles superficiales, de modo que las piezas requieren poco o ningún maquinado posterior u operaciones de acabado (formado neto). Debido a las altas presiones involucradas, se producen paredes tan delgadas como de 0.38 mm (0.015 pulg), que son más esbeltas que las obtenidas por otros métodos de fundición. Sin embargo, en las superficies de las piezas quedan marcas del eyector tanto como pequeñas cantidades de rebaba (material delgado que sale entre los dados).

Una pieza común hecha por fundición en dado es el impulsor de aluminio mostrado en la figura 11.1d; observe la intrincada forma y los finos detalles superficiales. En algunas piezas, la fundición en dado puede competir favorablemente con otros métodos de

TABLA 11.3

Propiedades y aplicaciones típicas de algunas aleaciones comunes fundidas en dado

Aleación	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones
Aluminio				
380 (3.5 Cu-8.5 Si)	320	160	2.5	Electrodomésticos, componentes automotrices, carcasas y estructuras de motores eléctricos.
13 (12 Si)	300	150	2.5	Formas complejas con paredes delgadas, piezas que requieren resistencia a las temperaturas elevadas.
Latón 858 (60 Cu)	380	200	15	Accesorios de plomería, cerrajería y herrería, bujes, fundiciones ornamentales.
Magnesio				
AZ91 B (9 Al-0.7 Zn)	230	160	3	Herramientas eléctricas, piezas automotrices, artículos deportivos.
Zinc				
Núm. 3 (4 Al)	280	—	10	Piezas automotrices, equipo de oficina, utensilios para el hogar, equipo de construcción, juguetes.
Núm. 5 (4 Al-1 Cu)	320	—	7	Electrodomésticos, piezas automotrices, equipo de construcción, equipos de oficina.

Fuente: Datos proporcionados por: American Die Casting Association, Wheeling, Illinois.

manufactura (por ejemplo, el estampado y forjado de lámina metálica) u otros procesos de fundición. Además, debido a que el metal fundido se enfría rápidamente en las paredes del dado, la pieza fundida tiene una película o piel dura, de grano fino y con alta resistencia. Por consiguiente, la relación resistencia a peso de las piezas fundidas en dado aumenta con la disminución del espesor de la pared. Con buen acabado superficial y precisión dimensional, la pieza fundida en dado puede producir superficies lisas para cojinetes que de otra manera tendrían que maquinarse.

Componentes tales como pernos, ejes y sujeciones roscadas pueden fundirse en dado íntegramente; a este proceso se le denomina **moldeo por inserto** y es similar a la colocación de palos de madera en las paletas de hielo antes de congelarlas (vea también la sección 19.3). Para lograr una buena resistencia interfacial, las superficies de los insertos pueden moletearse (vea la figura 23.11), ranurarse o estriarse. Los insertos de acero, latón y bronce son de uso común en las aleaciones fundidas en dado. En la selección de materiales para insertos, debe tomarse en cuenta la posibilidad de corrosión galvánica; para evitar este problema potencial, el inserto se puede aislar, recubrir o tratar superficialmente.

Debido a las altas presiones implicadas, en este tipo de fundición los dados tienen cierta tendencia a separarse a menos que se sujeten firmemente (vea la figura 11.21). Por lo tanto, las máquinas de fundición en dado se clasifican de acuerdo con la fuerza de cierre que pueden ejercer para mantener unidos los dados durante el vaciado. Las capacidades de las máquinas disponibles en el mercado van desde alrededor de 2.5 hasta 3000 toneladas. Otros factores implicados en la selección de máquinas de fundición en dado son el tamaño del dado, la carrera del pistón, la presión de disparo o inyección y el costo.

Para esta fundición, los dados (figura 11.22) pueden tener *una sola cavidad*, *cavidades múltiples* (varias cavidades idénticas), una *combinación de cavidades* (varias cavidades diferentes), o *dados unitarios* (pequeños dados simples que pueden combinarse en dos o más unidades en un dado maestro de sujeción). Por lo general, la relación del peso del dado al peso de la pieza es de 1000 a 1. Así, por ejemplo, el dado de una pieza de fundición que pesa 2 kg pesaría alrededor de 2000 kg. Los dados se hacen generalmente de acero para trabajo en caliente o de aceros para moldeo (vea la sección 5.7). El desgaste del dado aumenta con la temperatura del metal fundido. El **agrietamiento por calor** de los dados (resquebrajamiento de la superficie por el repetido calentamiento y enfriamiento del dado, descrito en la sección 3.6) puede ser un problema. Sin embargo, cuando los materiales se seleccionan y mantienen correctamente, los dados pueden durar más de medio millón de disparos o inyecciones antes de que se presente un desgaste significativo.

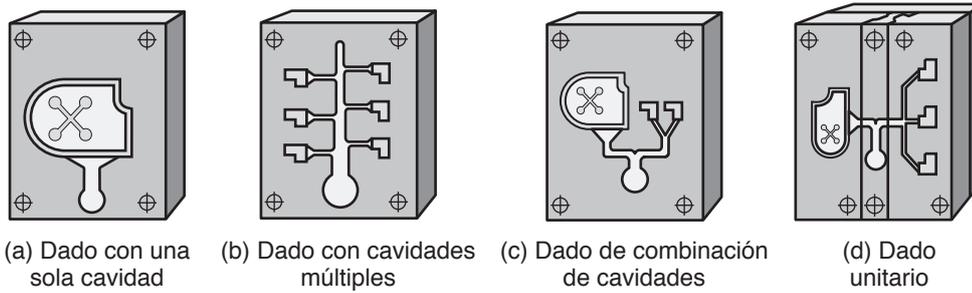


FIGURA 11.22 Diversos tipos de cavidades en un dado para fundición. *Fuente:* Imágenes proporcionadas por North American Die Casting Association, Wheeling, Illinois.

CASO DE ESTUDIO 11.4 Fundición en dado de un montaje de faro

En la figura 11.23 se muestra un componente de aluminio fundido en dado para servir de soporte a una luz de circulación diurna y una señal direccional para automóviles. El aluminio se prefirió sobre el plástico debido a sus características de mayor disipación de calor y rigidez, pero también debido a que se requerían tolerancias estrechas para el montaje y para proporcionar acceso al cableado de las bombillas LED. El tamaño, el espesor y el espaciado de la aleta se determinaron a partir de un análisis de transferencia de calor. Dada esta limitación, las aletas se redujeron para permitir un fácil retiro del dado y los radios de las esquinas se diseñaron adecuadamente para evitar su distorsión durante la eyección. Después, la pieza se orientó de modo que los orificios de montaje y los huecos fueran coplanares con la línea de separación del dado para simplificar la fabricación de éste.

Los canales de calentamiento se incorporaron al dado cerca de las secciones delgadas para lograr un enfriamiento lento, mientras que los canales de enfriamiento se incorporaron cerca de las secciones gruesas. El balance térmico resultante condujo a una menor distorsión en el producto final. La pieza terminada se

fundió usando aluminio 380 y mide 100 mm × 75 mm × 100 mm para la señal direccional y 250 mm × 100 mm × 50 mm para el subensamble de luz diurna.

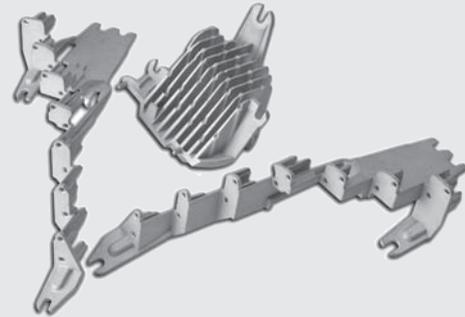


FIGURA 11.23 Montajes de una luz de circulación diurna y una señal direccional fundidos en dado y producidos usando aluminio para fundición a presión. *Fuente:* Cortesía de la American Foundry Society.

11.4.6 Fundición centrífuga

Como su nombre lo indica, el proceso de *fundición centrífuga* utiliza la inercia (causada por la rotación) para forzar el metal fundido a entrar en las cavidades del molde, un método que fue sugerido por primera vez a principios del siglo XIX. Las capacidades de la fundición centrífuga se dan en la tabla 11.2. Existen tres tipos de fundición centrífuga: fundición centrífuga verdadera, fundición semicentrífuga y centrifugado.

Fundición centrífuga verdadera. En la *fundición centrífuga verdadera* se producen piezas cilíndricas huecas (como tubos, cañones de pistola, bujes, camisas para pistones de motor, anillos de cojinete con o sin bridas y postes de luz urbanos) mediante la técnica que se muestra en la figura 11.24. En este proceso, el metal fundido se vacía en un molde

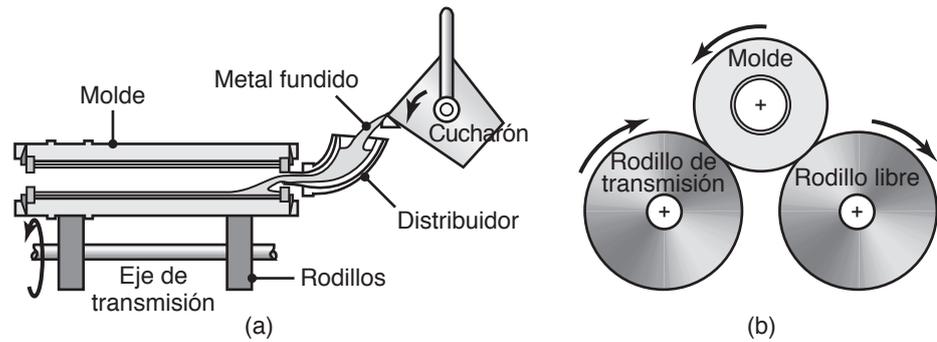


FIGURA 11.24 (a) Ilustración esquemática del proceso de fundición centrífuga; con este proceso pueden fundirse tubos, camisas de pistón y piezas con formas semejantes. (b) Vista lateral de la máquina.

giratorio donde el eje de rotación suele ser horizontal, pero también puede ser vertical para piezas de trabajo cortas. Los moldes están hechos de acero, hierro o grafito y pueden ser revestidos de material refractario para aumentar su vida útil. Las superficies del molde pueden conformarse de manera que puedan fundirse tubos con diferentes diseños externos. La superficie interior de la pieza fundida sigue siendo cilíndrica, puesto que el metal fundido se distribuye de manera uniforme debido a las fuerzas centrífugas. Sin embargo, dadas las diferencias de densidad, elementos más ligeros (como la escoria, las impurezas y piezas de revestimiento refractario presentes en el molde) tienden a acumularse en la superficie interior de la fundición y, en consecuencia, las propiedades de la pieza pueden variar en todo su espesor.

Es posible fundir en forma centrífuga piezas cilíndricas que van desde 13 mm (0.5 pulg) hasta 3 m (10 pies) de diámetro y 16 m (50 pies) de largo, con espesores de pared de entre 6 y 125 mm (0.25 y 5 pulg). La presión generada por la fuerza centrífuga es alta, pero necesaria para fundir piezas con paredes gruesas. Con este proceso se producen fundiciones de buena calidad, buena precisión dimensional y buenos detalles superficiales externos.

Fundición semicentrífuga. En la figura 11.25(a) se muestra un ejemplo de fundición semicentrífuga. Este método se utiliza para fundir piezas con simetría rotacional, como una rueda con rayos.

Centrifugado. En el *centrifugado*, proceso conocido también como *fundición centrífuga*, las cavidades del molde se colocan a cierta distancia del eje de rotación. El metal fundido se vacía desde el centro y es forzado a entrar en el molde por las fuerzas centrífugas (figura 11.25b). Las propiedades de las fundiciones pueden variar según la distancia a la que se encuentren a partir del eje de rotación, como en la fundición centrífuga verdadera.

11.4.7 Fundición por dado impresor y formado de metal semisólido

Dos procesos de fundición que incorporan las características de la fundición y el forjado (capítulo 14) son la fundición por dado impresor y el formado de metal semisólido.

Fundición por dado impresor. El proceso de *fundición por dado impresor* o *forjado de metal líquido* fue inventado en la década de 1930, pero se desarrolló para aplicaciones industriales en la década de 1960, y consiste en la solidificación de metal fundido a alta presión (figura 11.26). Los productos que se fabrican son componentes automotrices y cuerpos de mortero (un cañón corto). La máquina incluye un dado, un punzón y un perno eyector. La presión aplicada por el punzón mantiene los gases atrapados en la solución

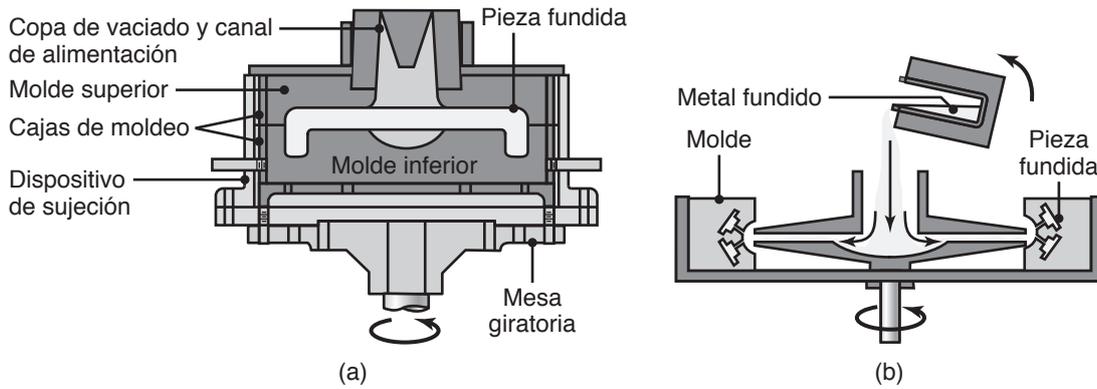


FIGURA 11.25 (a) Ilustración esquemática del proceso de fundición semicentrífuga; mediante este proceso, pueden fundirse ruedas con rayos. (b) Ilustración esquemática de la fundición por centrífuga; los moldes se colocan en la periferia de la máquina y el metal fundido es forzado a entrar a los moldes por la fuerza centrífuga.

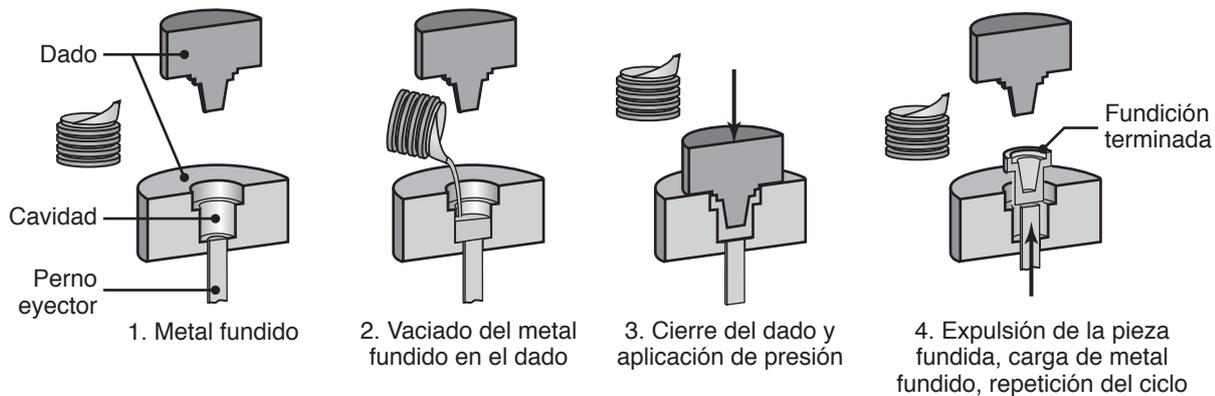


FIGURA 11.26 Secuencia de operaciones en el proceso de fundición por dado impresor; este proceso combina las ventajas de la fundición y el forjado.

y el contacto a alta presión en la interfase del dado con el metal promueve la transferencia rápida del calor, lo que resulta en una pieza fundida con microestructura fina y buenas propiedades mecánicas.

La aplicación de presión también supera las dificultades de alimentación que pueden surgir cuando se funden metales con un rango de solidificación largo (sección 10.2.2). Es posible hacer piezas complejas a una forma casi neta, con detalles superficiales finos, utilizando aleaciones ferrosas o no ferrosas.

Formado de metal semisólido. El *formado de metal semisólido* (también llamado *procesamiento en estado blando o pastoso*; vea la figura 10.4) se desarrolló en la década de 1970. Cuando entra en el dado, el metal (que consta de componentes líquidos y sólidos) se agita de manera que todas las dendritas se trituren en sólidos finos; cuando el metal se enfría en el dado, desarrolla una estructura de grano fino. La aleación exhibe un comportamiento tixotrópico, el cual se describió en la sección 10.2.3; por lo anterior, el proceso también se llama *tixoforado* o *tixomoldeado* e implica que la aleación reduce su viscosidad al agitarla. Por lo tanto, en reposo y por encima de su temperatura de solidus, la aleación fundida tiene la consistencia de la mantequilla;

pero cuando se le agita vigorosamente, su consistencia se vuelve más parecida a la del aceite para motor.

El procesamiento de metales en estado blando o pastoso también ha conducido a desarrollos en la *extrusión en estado blando o pastoso*, similar al moldeo por inyección (que se describe en la sección 19.3), al *forjado y laminado* (de ahí el término *conformado metálico semisólido*). Estos procesos también se utilizan en la fabricación de piezas con aleaciones fundidas especialmente diseñadas, aleaciones forjadas y materiales compósitos de matriz metálica (sección 9.5). Asimismo tienen la capacidad de mezclar gránulos de diferentes aleaciones, llamadas *tixomezclas*, para aplicaciones específicas.

El comportamiento tixotrópico también se ha utilizado en el desarrollo de tecnologías que combinan la fundición y el forjado de piezas, usando tochos fundidos que se forjan cuando el metal está entre 30 y 40% en estado líquido. Las piezas que se fabrican incluyen palancas para automóviles, soportes y componentes de dirección. El procesamiento de acero por tixoforado aún no ha alcanzado el mismo nivel que con el aluminio y el magnesio, en gran parte debido a las altas temperaturas implicadas que afectan negativamente la vida del dado y dificultan la elaboración de formas complejas.

Las ventajas del formado de metal semisólido sobre la fundición en dado son: (a) las estructuras desarrolladas son homogéneas, con propiedades uniformes, baja porosidad y alta resistencia; (b) se pueden hacer piezas tanto finas como gruesas; (c) se pueden usar aleaciones fundidas tanto como aleaciones forjadas; (d) las piezas pueden tratarse después térmicamente, y (e) el menor supercalentamiento resulta en tiempos de ciclo más cortos. Sin embargo, los costos del material y generales son más altos que los de la fundición en dado.

Reofundición. Esta técnica, que se investigó por primera vez en la década de 1960, se utiliza para el formado de metales en estado semisólido. El metal se calienta justo por encima de su temperatura de solidus y se vacía en un recipiente para que se enfríe hasta un estado semisólido; después se mezcla la suspensión o lodo y se lleva al molde o dado. Este proceso se está utilizando con éxito en aleaciones de aluminio y magnesio.

11.4.8 Operaciones de fundición con molde compuesto

Los *moldes compósitos* están hechos de dos o más materiales diferentes y se utilizan en el moldeo en cáscara y en otros procesos de fundición diversos; se emplean generalmente en la fundición de formas complejas tales como impulsores para turbinas. Los moldes compósitos aumentan la resistencia del molde, mejoran la precisión dimensional y el acabado superficial de las piezas moldeadas y pueden ayudar a reducir los costos generales y el tiempo de procesamiento. Los materiales de moldeo utilizados comúnmente son cascarones (hechos como se describió en la sección 11.2.2), yeso, arena con aglutinante, metal y grafito. Estos moldes también pueden incluir corazones y enfriadores para controlar la velocidad de solidificación en las áreas críticas de las fundiciones.

11.5 Técnicas de fundición para componentes monocristalinos

En esta sección se describen las técnicas utilizadas para fundir componentes monocristalinos, como los álabes de turbinas a gas que generalmente están hechos a partir de superaleaciones a base de níquel y se utilizan en las etapas de calentamiento del motor.

Fundición convencional de álabes de turbina. En el *proceso convencional de fundición*, el metal fundido se vacía en un molde cerámico y comienza a solidificarse en las paredes del molde. La estructura de grano desarrollada es policristalina, similar a la mostrada en la figura 10.2c. Sin embargo, la presencia de los límites de grano hace que

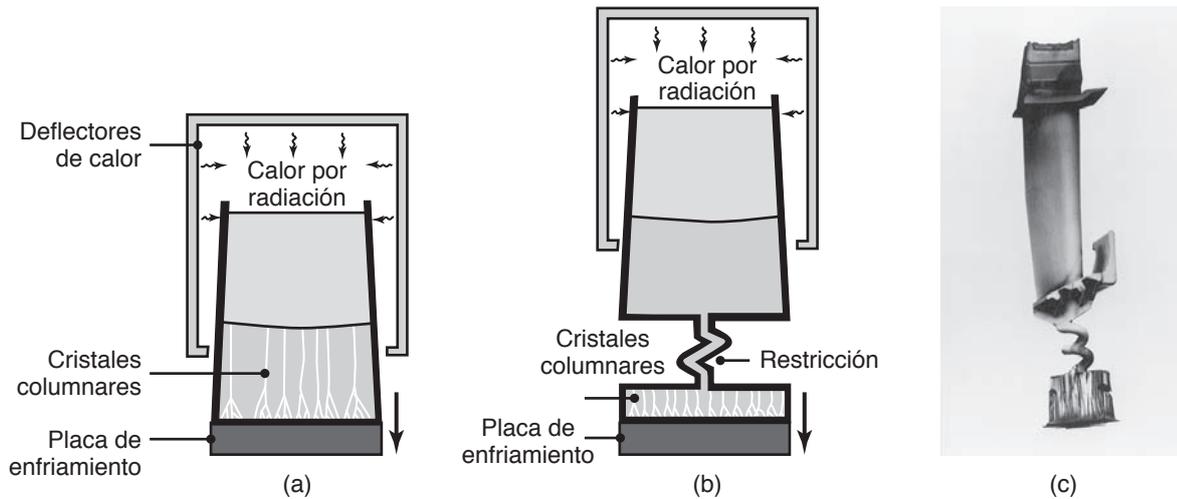


FIGURA 11.27 Métodos de fundición de álabes para turbina: (a) solidificación direccional; (b) método para producir un álabé monocristalino y (c) álabé monocristalino con la porción de restricción aún adherida (vea también la figura 1.1). Fuente: (a) y (b) Según B. H. Kear, (c) cortesía de ASM International.

esta estructura sea susceptible a la cedencia o fluencia y a la formación de grietas a lo largo de los límites ubicados bajo las fuerzas centrífugas y las temperaturas elevadas que se encuentran comúnmente durante la operación de una turbina a gas.

Álabes solidificados direccionalmente. El *proceso de solidificación direccional* (figura 11.27a) se desarrolló por primera vez en 1960. El molde de material cerámico, apoyado sobre una placa de enfriamiento por agua, se precalienta utilizando calor por radiación o radiante; después que el metal se vacía en el molde, el ensamble de la placa enfriadora se hace descender lentamente. Los cristales comienzan a crecer en la superficie de la placa enfriadora y continúan ascendiendo, como los *granos columnares* que se muestran en la figura 10.3. El álabé se solidifica direccionalmente con los límites de grano longitudinales, pero no transversales. Así, el álabé es más resistente en la dirección de las fuerzas centrífugas que se desarrollan en la turbina de gas.

Álabes monocristalinos. En el *crecimiento de cristales*, desarrollado en 1967, el molde tiene una restricción en forma de sacacorchos o hélice (figuras 11.27b y c) con una sección transversal tan pequeña que sólo permite el paso de un cristal. El mecanismo de crecimiento de los cristales es tal que solamente los cristales orientados favorablemente son capaces de crecer a través de la hélice (situación similar a la mostrada en la figura 10.3) porque todos los demás son interceptados por las paredes del pasaje helicoidal.

A medida que el ensamble descende lentamente, un solo cristal crece en forma ascendente a través de la restricción y comienza a crecer en el molde, el control estricto de la velocidad de movimiento resulta esencial. Aunque los álabes monocristalinos son más caros que los de otros tipos, la ausencia de límites de grano los hace resistentes a la termofluencia y al choque térmico; por lo tanto, tienen una vida de servicio más larga y confiable.

Crecimiento de monocristales. El crecimiento de monocristales es una actividad importante para la industria de los semiconductores en la fabricación de obleas de silicio para dispositivos microelectrónicos. Existen dos métodos básicos para practicar el crecimiento de cristales:

- En el **método de extracción de cristal**, también conocido como **proceso de Czochralski (CZ)**, figura 11.28), un cristal semilla se sumerge en metal fundido y luego

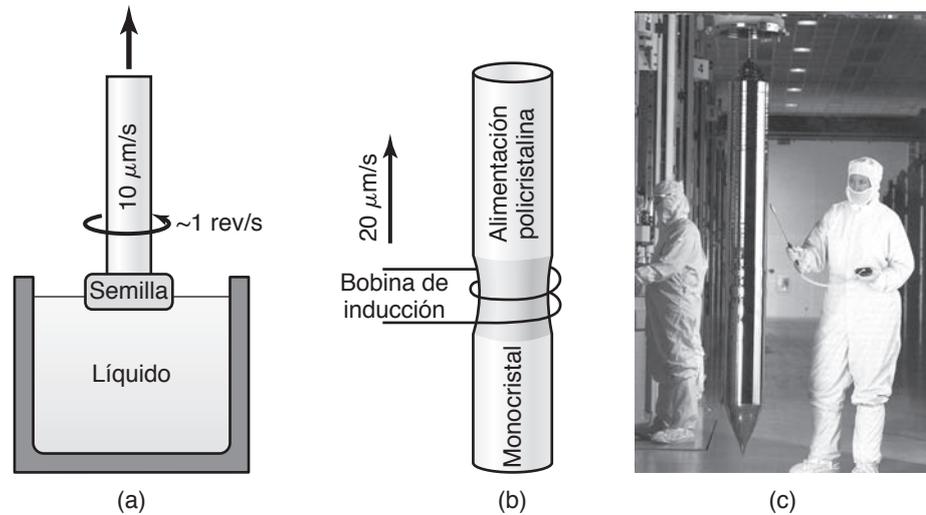


FIGURA 11.28 Dos métodos de crecimiento cristalino: (a) extracción de cristal (proceso de Czochralski) y (b) método de zona flotante. El crecimiento de cristales resulta especialmente importante en la industria de los semiconductores. (c) Lingote monocristalino producido mediante el proceso de Czochralski. *Fuente:* Cortesía de Intel Corporation.

se extrae de manera lenta (a una velocidad de aproximadamente $10 \mu\text{m/s}$) mientras se rota. El metal líquido comienza a solidificarse sobre la semilla y la estructura cristalina de la semilla continúa desarrollándose. Es posible agregar *dopantes* (elementos de aleación) al metal líquido para impartir propiedades eléctricas específicas. Mediante este proceso, se producen monocristales de silicio, germanio y otros diversos elementos. Se han elaborado lingotes monocristalinos de hasta 400 mm (16 pulg) de diámetro y más de 2 m (80 pulg) de longitud por medio de esta técnica, aunque los lingotes más comunes son de 300 mm (12 pulg) en la producción de obleas de silicio para la fabricación de circuitos integrados.

- El **método de zona flotante** (figura 11.28b) comienza con una barra de silicio policristalino que descansa sobre un monocristal, una bobina de inducción calienta estas dos piezas mientras la bobina se mueve lentamente hacia arriba. El monocristal crece, manteniendo al mismo tiempo su orientación. Se cortan obleas delgadas de la varilla, se limpian y pulen para su uso en la fabricación de dispositivos microelectrónicos. Este proceso es adecuado para la producción de diámetros inferiores a 150 mm (6 pulg) con niveles de impurezas muy bajos.

11.6 Solidificación rápida

Las propiedades de las *aleaciones amorfas*, también conocidas como *vidrios metálicos*, se describen en la sección 6.14. La técnica para la fabricación de estas aleaciones (denominada *solidificación rápida*) implica enfriar el metal fundido a velocidades tan altas como 10^6 K/s , por lo que no tienen tiempo suficiente para cristalizar (vea también la figura 1.11). La solidificación rápida resulta en una extensión significativa de la solubilidad sólida (sección 4.2), en el refinamiento del grano y en una menor microsegregación (vea la sección 10.2.3), entre otros efectos.

En un método común, llamado **enfriamiento por disco rotatorio** (figura 11.29), la aleación se funde por inducción en un crisol cerámico. A continuación, se impulsa bajo una alta presión de gas, sobre un disco giratorio de cobre (bloque de enfriamiento), que enfría la aleación rápidamente (**enfriamiento por salpicado**).

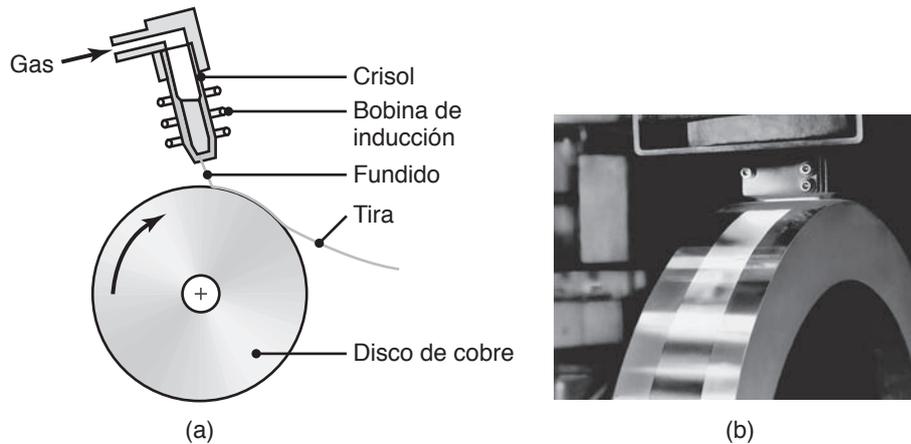


FIGURA 11.29 (a) Ilustración esquemática del enfriamiento por disco rotatorio para producir tiras delgadas de metal amorfo. (b) Fotografía de la producción de una aleación de níquel mediante enfriamiento por disco rotatorio. *Fuente:* Cortesía de Siemens AG.

11.7 Inspección de piezas fundidas

Se pueden usar varios métodos para inspeccionar piezas fundidas con el fin de determinar su calidad, la presencia de defectos y los tipos de defectos existentes. Las piezas fundidas pueden inspeccionarse *visual* y *ópticamente* en busca de defectos en la superficie. Los defectos subsuperficiales e internos se investigan utilizando diversas técnicas no destructivas, las cuales se describen en la sección 36.10. En los *ensayos destructivos* (sección 36.11), se retiran muestras de varias secciones de una pieza fundida y se prueba su resistencia, ductilidad y otras propiedades mecánicas; asimismo, se determina la presencia, localización y distribución de porosidad y cualquier otro defecto.

La *hermeticidad a presión* de los componentes fundidos (por ejemplo, válvulas, bombas y tuberías) se determina por lo general mediante el sellado de las aberturas en la fundición; después, se presuriza con agua, aceite o aire. Para los requisitos de hermeticidad en aplicaciones críticas, se usa helio a presión o gases con un aroma particular como detectores (por olor, *sniffers*). Después se inspecciona la fundición para que no haya fugas mientras se mantiene la presión; las piezas fundidas que son inaceptables o están defectuosas se funden de nuevo para volver a procesarlas.

11.8 Procedimientos y hornos de fusión

El procedimiento de fusión es un aspecto importante de las operaciones de fundición, puesto que tiene una influencia directa en la calidad de las piezas fundidas. Los hornos se cargan con el *material de fusión* que consiste en metal, elementos aleados y otros diversos materiales como **fundentes** y constituyentes que forman escoria. Los fundentes son compuestos inorgánicos que refinan el metal fundido mediante la eliminación de gases disueltos y diversas impurezas; pueden añadirse manualmente o inyectarse en forma automática en el metal fundido.

Hornos de fusión. Los hornos de fusión utilizados comúnmente en las fundiciones son hornos de arco eléctrico, hornos de inducción, hornos de crisol y cubilotes.

1. Los hornos de **arco eléctrico**, descritos en la sección 5.2.3 e ilustrados en la figura 5.2, son ampliamente usados en las fundidoras debido a su alto grado de fusión (y, por lo tanto, su alta tasa de producción), a que contaminan mucho menos que

los otros tipos de horno y a su capacidad de mantener el metal fundido (*es decir*, de conservarlo a una temperatura constante durante cierto periodo) para propósitos de aleación.

- Los hornos de **inducción** (figura 5.2c) son especialmente útiles en las fundidoras de menor tamaño y producen fusiones de composición controlada más pequeñas. Existen dos tipos básicos: el *horno de inducción sin núcleo* consiste en un crisol rodeado de una bobina de cobre enfriada por agua y a través de la cual pasa corriente de alta frecuencia. Debido a que existe una fuerte agitación electromagnética durante la acción de calentamiento por inducción, este tipo de horno tiene excelentes características de mezclado para la aleación y la adición de una nueva carga de metal en el horno. El otro tipo, llamado *horno de núcleo o de canal*, utiliza corriente de baja frecuencia (tan baja como 60 Hz) y tiene una bobina que rodea sólo una pequeña porción de la unidad.

Estos hornos se utilizan de modo habitual en las fundiciones no ferrosas y son especialmente adecuados para (a) el supercalentamiento (calentamiento por encima de la temperatura normal de fundición con el fin de mejorar la fluidez), (b) el mantenimiento, son ideales para aplicaciones de fundición en dado, y (c) duplexado (utilizando dos hornos —por ejemplo, al fundir el metal en un horno para después transferirlo al otro).

- Los hornos de **crisol** (figura 11.30a), que se han utilizado ampliamente a través de la historia, se calientan con diversos combustibles, como gases comerciales, petróleo combustible, combustibles fósiles y electricidad. Los hornos de crisol pueden ser fijos, basculantes y móviles.
- Los hornos de **cubilote** son básicamente recipientes verticales de acero con revestimiento refractario, los cuales se cargan con capas alternadas de metal, coque y fundente (figura 11.30b). A pesar de que requieren grandes inversiones y se sustituyen cada vez más por los hornos de inducción, los hornos de cubilote operan de manera continua, tienen un alto grado de fusión y pueden producir grandes cantidades de metal fundido.
- La **fusión por levitación** implica la *suspensión magnética* del metal fundido. Una bobina de inducción calienta simultáneamente un tocho sólido y agita y confina la masa fundida, eliminando así la necesidad de un crisol (el cual podría contaminar el metal fundido con inclusiones de óxido). El metal fundido fluye hacia un molde para fundición por revestimiento colocado directamente debajo de la bobina. Las fundiciones por revestimiento realizadas con este método están libres de inclusiones refractarias y porosidad por gases, también tienen una estructura uniforme de grano fino.

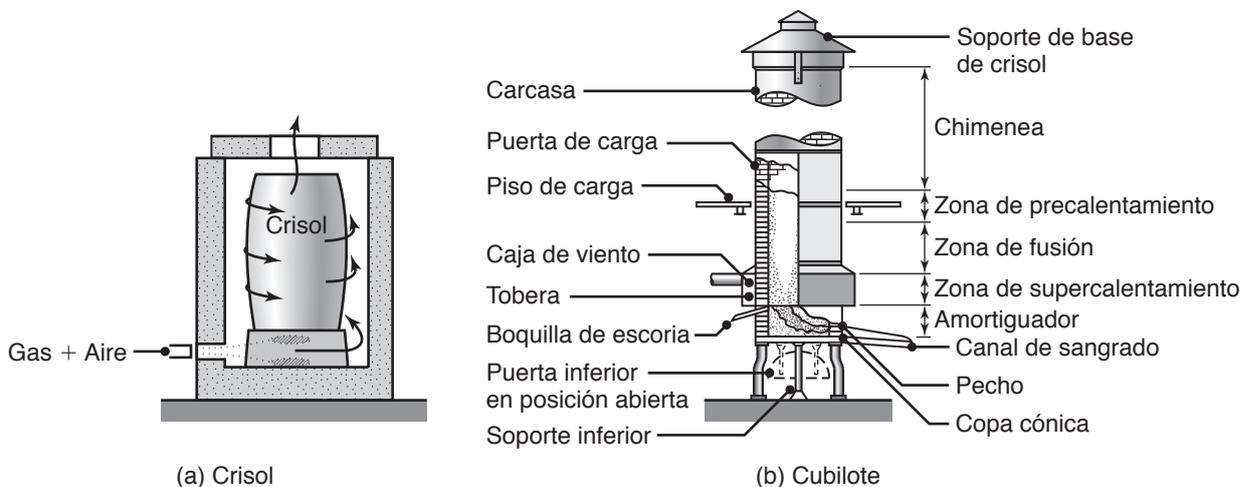


FIGURA 11.30 Dos tipos de hornos de fusión utilizados en las fundidoras.

11.9 Fundidoras y automatización de fundidoras

Las operaciones de fundición se llevan a cabo habitualmente en fundidoras (del latín *fundere* que significa “fundición y vaciado”). Aunque estas operaciones tradicionalmente han implicado mucho trabajo manual, las fundidoras modernas han incorporado la automatización y la integración por computadora de todos los aspectos de sus operaciones.

Como se describe en la figura 11.2, las operaciones de la fundidora inicialmente involucran dos grupos distintos de actividades. El primer grupo es la fabricación de modelos y moldes. Las técnicas de diseño y manufactura asistida por computadora (capítulo 38) y prototipado rápido (capítulo 20) son ampliamente utilizados para minimizar el ensayo y error y así mejorar la eficiencia. Se utiliza una variedad de maquinarias automatizadas para reducir al mínimo los costos de mano de obra, los cuales pueden ser significativos en la producción de piezas de fundición.

El segundo grupo de actividades implica la fusión de los metales y el control de su composición y de las impurezas. Operaciones como el vaciado en moldes (algunos trasladados mediante bandas transportadoras), el sacudido, la limpieza, el tratamiento térmico y la inspección también se automatizan. La automatización reduce al mínimo el trabajo, disminuye la posibilidad del error humano, aumenta la tasa de producción y permite alcanzar niveles más altos de calidad. En la actualidad, los robots industriales (sección 37.6) se utilizan ampliamente en las operaciones de fundición; por ejemplo, en limpieza, cortes de mazarota, ventilación del molde, moldeo por pulverización, vaciado, clasificación e inspección. Otras operaciones incluyen sistemas de almacenamiento automático para los corazones y modelos, en los que se utilizan vehículos guiados automáticamente (sección 37.5).

RESUMEN

- Los procesos de molde desechable y modelo permanente incluyen la fundición en arena, en molde de cáscara, en molde de yeso y en molde cerámico. Estos procesos requieren la destrucción del molde en cada fundición producida, pero la producción de moldes se facilita gracias a los modelos reutilizables.
- Los procesos de molde y modelo desechables incluyen las fundiciones de espuma perdida (poliestireno expandido) y por revestimiento. En estos procesos, se consume un modelo para cada molde producido y el molde se destruye después de cada fundición.
- Los procesos de molde permanente tienen moldes o dados que se pueden utilizar para producir piezas de fundición a altas tasas de producción. Los procesos comunes de molde permanente incluyen las fundiciones huecas por escurrimiento, a presión, en dado y centrífuga.
- Los moldes utilizados en la fundición de molde permanente están hechos de metal o grafito y se utilizan repetidamente para producir un gran número de piezas. Debido a que los metales son buenos conductores del calor pero no permiten el escape de gases, los moldes permanentes tienen efectos fundamentalmente diferentes sobre las fundiciones a los que tiene la arena u otros materiales de molde agregados.
- En la fundición de molde permanente, los costos del dado y el equipo son relativamente altos, pero los procesos son económicos para grandes corridas de producción. La cantidad de desperdicios es baja, la precisión dimensional es relativamente alta y pueden lograrse buenos detalles superficiales.
- Otros procesos incluyen la fundición por dado impresor (una combinación de fundición y forjado), el formado de metal semisólido, la solidificación rápida (para la producción de aleaciones amorfas) y la fundición de componentes monocristalinos [como álabes para turbina y lingotes de silicio para la fabricación de obleas (waffers) en la manufactura de circuitos integrados].
- Los procesos de fusión y su control también son factores importantes en las operaciones de fundición. Incluyen la fusión apropiada de los metales, preparación para la aleación, eliminación de escoria y desechos y el vaciado del metal fundido en los moldes. La inspección de las piezas fundidas en busca de posibles defectos internos o externos también resulta esencial.

- Las piezas fundidas suelen someterse a procesamientos posteriores, como operaciones de maquinado y tratamiento térmico, para producir las formas finales y las características superficiales deseadas, así como el acabado superficial y la precisión dimensional que hayan sido requeridos.

TÉRMINOS CLAVE

Agente separador	Fundición de modelo desechable	Fundición en molde permanente	Molde permanente
Aglutinantes	Fundición de modelo evaporable	Fundición hueca por escurrimiento	Moldeo con grafito apisonado
Arena para moldeo en verde	Fundición de precisión	Fundición por dado impresor	Moldeo por inserto
Corazones	Fundición en arena	Fundición por revestimiento	Plantillas de corazón
Crecimiento de cristales	Fundición en dado (o inyección de metales)	Fundidora	Proceso de espuma perdida o modelo consumible
Formado de metal semisólido	Fundición en molde cerámico	Fusión por levitación	Prototipado rápido
Fundentes	Fundición en molde de cáscara	Modelos	Reofundición
Fundición a la cera perdida	Fundición en molde de yeso	Molde compósito	Solidificación rápida
Fundición a presión		Molde desechable	Soportes
Fundición al vacío			Tixotropía
Fundición centrífuga			

BIBLIOGRAFÍA

- Analysis of Casting Defects, American Foundrymen's Society, 2002.
- ASM Handbook, Vol. 15: Casting, ASM International, 2008.
- Beeley, P., Foundry Technology, Butterworth-Heinemann, 2002.
- Blair, M., Stevens, T. L. y Linskey, B. (eds.), Steel Castings Handbook, 6a. ed., ASM International, 1995.
- Campbell, J., Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design, Butterworth-Heinemann, 2011.
- Investment Casting Handbook, Investment Casting Institute, 1997.
- Kaufman, J. G. y Rooy E. L., Aluminum Alloy Castings Properties, Processes and Applications, ASM International, 2004.
- Kirkwood, D. H., Suery, M., Kapranos, P. y Atkinson, H. V., Semi-solid Processing of Alloys, Springer, 2009.
- Martin, A., The Essential Guide to Mold Making & Slip Casting, Lark Books, 2007.
- Sias, F. R., Lost-Wax Casting, Woodsmere Press, 2006.
- Vinarcik, E. J., High Integrity Die Casting, Wiley, 2002.
- Young, K. P., Semi-solid Processing, Chapman & Hall, 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

- 11.1 Describa las diferencias entre los moldes desechables y los moldes permanentes.
- 11.2 Mencione los factores importantes en la selección de arena para moldes.
- 11.3 ¿Cuáles son los principales tipos de moldes de arena? ¿Cuáles son sus características?
- 11.4 Liste las consideraciones importantes al seleccionar los materiales necesarios para un modelo.
- 11.5 ¿Cuál es la función de un corazón?
- 11.6 ¿Cuál es la diferencia entre la fundición en molde de arena y la fundición en molde de cáscara?
- 11.7 ¿Qué son los moldes compósitos? ¿Por qué se utilizan?
- 11.8 Describa las características de la fundición en molde de yeso.
- 11.9 Mencione el tipo de materiales que se utilizan comúnmente para los procesos de fundición en molde permanente.
- 11.10 ¿Cuáles son las ventajas de la fundición a presión sobre otros procesos?
- 11.11 Liste las ventajas y limitaciones de la fundición en dado.
- 11.12 ¿Cuál es el propósito de una mazarota? ¿Qué es una mazarota ciega?
- 11.13 Explique el propósito de un respiradero y un distribuidor en un molde de fundición.
- 11.14 ¿Cómo se producen los moldes de cáscara?
- 11.15 ¿Qué mantiene unido al molde en una fundición al vacío?
- 11.16 ¿Qué es la fundición por dado impresor? ¿Cuáles son sus ventajas?
- 11.17 ¿Cuáles son las ventajas del proceso de fundición de espuma perdida o modelo evaporable o consumible?
- 11.18 ¿Cómo se fabrican los álabes de turbina monocristalinas?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

11.19 ¿Cuáles son las razones por las que, a lo largo de los años, se han desarrollado una gran variedad de procesos de fundición? Explique con ejemplos concretos.

11.20 ¿Por qué las mazarotas no son tan útiles en la fundición en dado como lo son en la fundición en arena?

11.21 Describa los inconvenientes de tener una mazarota que sea (a) demasiado grande y (b) demasiado pequeña.

11.22 ¿Por qué las mazarotas ciegas pueden ser más pequeñas que las mazarotas abiertas?

11.23 ¿Por qué la fundición en dado produce las piezas fundidas más pequeñas?

11.24 ¿Por qué el proceso de fundición por revestimiento es capaz de producir detalles superficiales finos en las fundiciones?

11.25 ¿Qué diferencias esperaría encontrar usted en las propiedades de las fundiciones hechas con molde permanente con respecto a las fabricadas con procesos de fundición en arena?

11.26 Recientemente se han producido corazones de fundición en arena empleando sal. ¿Qué ventajas y desventajas pueden esperarse del uso de corazones de sal?

11.27 ¿Recomendaría usted precalentar los moldes utilizados en la fundición de molde permanente? ¿Retiraría usted la pieza fundida poco después de haberse solidificado? Explique sus razones.

11.28 Proporcione razones para utilizar insertos en dado y ejemplos de su uso.

11.29 En referencia a la figura 11.3, ¿cree usted que sea necesario anclar o sujetar las dos mitades del molde? Explique sus razones. ¿Considera usted que el tipo de metal fundido, por ejemplo hierro fundido gris en vez de aluminio, debe establecer una diferencia en la fuerza de sujeción? Explique su respuesta.

11.30 Explique por qué la fundición por dado impresor produce piezas con mejores propiedades mecánicas, precisión dimensional y acabado superficial que los procesos de molde desechable.

11.31 ¿Cómo se unen los modelos de cera individuales a un "árbol" para la fundición por revestimiento?

11.32 Describa las medidas que usted tomaría para reducir el cambio de corazones en la fundición en arena.

11.33 Se ha visto que, aunque la fundición en dado produce piezas delgadas, hay un límite a lo delgadas que éstas pueden ser. ¿Por qué no pueden hacerse piezas más delgadas mediante este proceso?

11.34 ¿Cómo se hacen las piezas huecas con diversas cavidades por fundición en dado? ¿Se utilizan corazones? Si es así, ¿cómo? Explique.

11.35 Se estableció que la relación de resistencia a peso de las fundiciones aumenta con la disminución del espesor de pared. Explique por qué.

11.36 ¿Cómo se colocan mazarotas y bebederos en los moldes de arena? Explique con los bosquejos apropiados.

11.37 En la fundición en molde de cáscara, el proceso de curado es crítico para la calidad del molde acabado. En esta etapa del proceso, el ensamble del molde de cáscara y los corazones se coloca en un horno durante un corto periodo para completar el curado de la resina aglutinante. Liste las causas probables de un curado desigual o de un espesor irregular de los corazones.

11.38 ¿Por qué la máquina de fundición en dado que se muestra en la figura 11.21 tiene un gran mecanismo para cerrar los dados? Explique.

11.39 Existen productos de chocolate disponibles en formas huecas. ¿Qué proceso debe utilizarse para hacer estos chocolates?

11.40 ¿Cuáles son los beneficios de calentar el molde en la fundición por revestimiento antes de vaciar el metal fundido? ¿Existe algún inconveniente? Explique su respuesta.

11.41 El estado "blando o pastoso" de las aleaciones se refiere al estado que se encuentra entre las temperaturas del solidus y el liquidus, como se describe en la sección 10.2.2. Los metales puros no tienen tal estado blando. ¿Esto significa que los metales puros no pueden manufacturarse por fundición hueca? Explique su respuesta.

11.42 ¿Puede un soporte actuar también como enfriador? Explique su respuesta.

11.43 Clasifique los procesos de fundición descritos en este capítulo en términos de su velocidad de solidificación. Es decir, ¿cuál proceso extrae calor más rápidamente de un volumen dado de metal?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

11.44 Estime la fuerza de sujeción de una máquina de fundición en dado o matriz donde la pieza es rectangular con dimensiones proyectadas de 100×150 mm (4×6 pulg). ¿Su respuesta dependerá de si se cuenta con una cámara caliente o una cámara fría? Explique.

11.45 El espacio para el carrete que se muestra en la figura P11.45 debe fundirse en arena con A-319, una aleación de aluminio para fundición. Haga un bosquejo del modelo de madera requerido para esta pieza e incluya todas las tolerancias necesarias para la contracción y el maquinado.

11.46 Repita el problema 11.45, pero ahora suponga que el carrete de aluminio se hará por fundición de modelo desechable. Explique las diferencias importantes entre los dos modelos.

11.47 En la fundición en arena, es importante que la mitad del molde superior tenga la fuerza suficiente para evitar que flote después de vaciar el metal fundido. Para la fundición mostrada en la figura P11.47, calcule el peso mínimo necesario para evitar la flotación del molde superior a medida que se vacía el metal fundido (*Sugerencia:* Tome en cuenta que la fuerza de flotación ejercida por el metal fundido sobre el molde superior depende de la altura efectiva de la cantidad de metal que haya en el molde superior).

11.48 Si para producir una pieza por fundición centrífuga se requiere una aceleración de $100g$ y dicha pieza tiene diámetro interno de 8 pulg, diámetro medio exterior de 14 pulg y longitud de 20 pies, ¿qué velocidad giratoria se necesita?

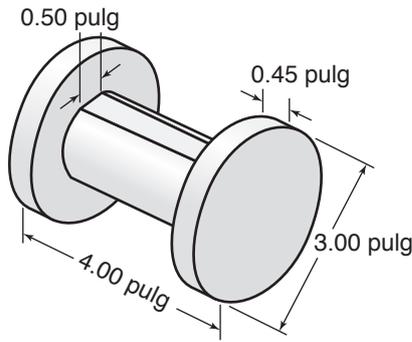
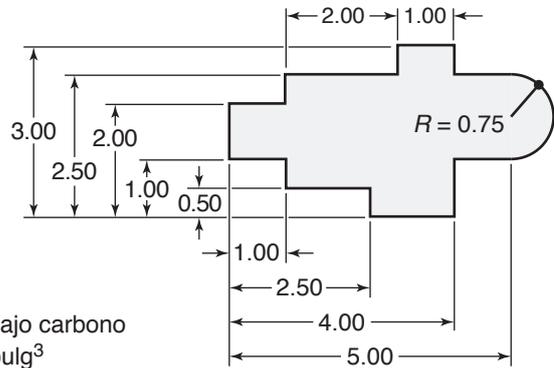
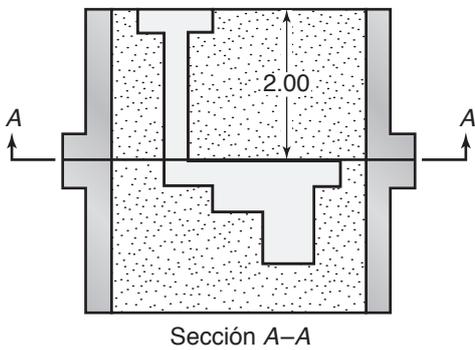


FIGURA P11.45

11.49 Un joyero desea producir 24 anillos de oro en una operación de fundición por revestimiento, como se ilustra en la figura II.1b. Las partes de cera se unen a un bebedero central de cera que tiene 0.625 pulg de diámetro. Los anillos se sitúan en cuatro filas, cada una separada por 0.5 pulg de la otra en el bebedero. Los anillos requieren una compuerta con 0.125 pulg de diámetro y 0.5 pulg de longitud hacia el bebedero. Estime el peso del oro necesario para llenar completamente los anillos, distribuidores y bebederos. La gravedad específica del oro es 19.3.

11.50 Suponga que usted es un profesor que cubre los temas descritos en este capítulo y va a aplicar un examen sobre los aspectos numéricos de los procesos de fundición para comprobar la comprensión de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.



Material: Acero al bajo carbono
 Densidad: 0.26 lb/pulg³
 Todas las dimensiones son en pulgadas

FIGURA P11.47

SÍNTESIS, DISEÑO y PROYECTOS

11.51 Describa los procedimientos que estarían involucrados en la realización de una gran estatua de bronce al aire. ¿Qué proceso(s) de fundición sería(n) adecuado(s)? ¿Por qué?

11.52 La forma óptima de una mazarota es esférica para asegurar que se enfríe más lentamente que la fundición que alimenta; sin embargo, las mazarotas de forma esférica son difíciles de fundir. (a) Bosqueje la forma de una mazarota ciega que sea fácil de moldear y tenga también la relación de área superficial a volumen más pequeña posible. (b) Compare el tiempo de solidificación de la mazarota bosquejada en el inciso (a) con el tiempo de una mazarota en forma de cilindro circular recto. Suponga que el volumen de cada mazarota es el mismo y que su altura es igual a su diámetro (vea el ejemplo 10.1).

11.53 Bosqueje y describa una línea de fundición que conste de máquinas, bandas transportadoras, robots, sensores, etc., la cual pueda realizar de manera automatizada el proceso de fundición de un modelo desechable.

11.54 Describa los procesos de fundición que serían más adecuados para hacer juguetes pequeños. Explique sus opciones.

11.55 Haga una lista de los materiales con que están hechos los moldes y dados utilizados en los procesos de fundición descritos en este capítulo. Para cada tipo de material, liste los procesos de fundición que se utilizan y explique por qué estos procesos son adecuados para el material del que está hecho el molde o el dado en particular.

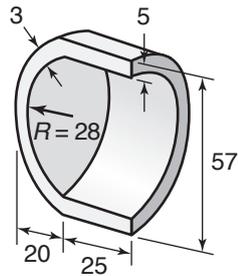
11.56 Escriba un documento breve sobre la permeabilidad de los moldes y las técnicas que se utilizan para determinarla.

11.57 Los metales ligeros suelen fundirse en moldes de hule vulcanizado. Realice una búsqueda en la literatura y describa la mecánica de este proceso.

11.58 En ocasiones es deseable enfriar los metales más lentamente de lo que se enfriarían si se mantuvieran a temperatura ambiente. Liste y explique los métodos que usaría usted para hacer más lento el proceso de enfriamiento.

11.59 La pieza mostrada en la figura P11.59 es un cascarón semiesférico utilizado como una copa acetabular (en forma de hongo) en una prótesis total de cadera. Seleccione un proceso de fundición para fabricar esta pieza y proporcione un bosquejo

de todos los modelos o herramientas que se necesitarían para producirla a partir de una aleación de cobalto-cromo.



Dimensiones en mm

FIGURA P11.59

11.60 En la figura P11.60 se ilustra la porosidad que se ha desarrollado en el mamelón de una fundición. Demuestre que la

porosidad puede eliminarse simplemente al cambiar la posición de la línea de partición de esta fundición.

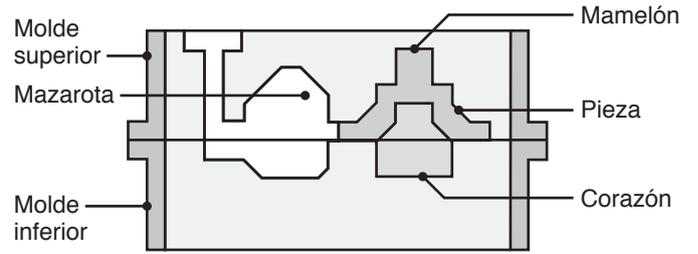


FIGURA P11.60

11.61 En la figura II.1b las gemas se han trabajado *in situ*. Diseñe un anillo con un medio de aseguramiento de una gema en el modelo de cera, de modo que la gema permanezca en el molde a medida que se funde la cera. ¿Podría aplicarse este planteamiento para la fundición de espuma perdida o poliestireno expandido?

12

Fundición de metales:
diseño, materiales
y consideraciones
económicas

12.1	Introducción	294
12.2	Consideraciones de diseño en la fundición	294
12.3	Aleaciones para las fundiciones	303
12.4	Consideraciones económicas en la fundición	308

CASO DE ESTUDIO:

12.1	Ejemplos ilustrativos de fundiciones con diseños pobres y buenos	301
------	--	-----

- Este capítulo final sobre la fundición de metales sirve como una guía general para referir las interrelaciones entre el diseño de productos, los materiales, el proceso de selección y las consideraciones económicas que tienen lugar en la fundición.
- El capítulo describe con detalle las consideraciones de diseño para las operaciones de fundición y las directrices generales para obtener una fundición exitosa.
- Después se describen las características y aplicaciones de las aleaciones ferrosas y no ferrosas más comunes.
- El capítulo termina con un análisis de la economía relacionada con las fundiciones.

12.1 Introducción

En los dos capítulos anteriores, observamos que el éxito en la práctica de la fundición requiere de un control adecuado de un gran número de variables. Estas variables se refieren a las características particulares de los metales y las aleaciones de fundición, al método de fundición, a los materiales de moldes y dados, al diseño de los moldes y a los parámetros de procesamiento. Factores como el flujo del metal fundido en las cavidades del molde, los sistemas de alimentación, la velocidad de enfriamiento y los gases desprendidos influyen en la calidad de una fundición.

En este capítulo se describen las consideraciones generales de diseño para la fundición de metales y se presentan recomendaciones para evitar defectos. Posteriormente, se describen las características de los metales y aleaciones que se funden comúnmente, junto con sus aplicaciones típicas. Debido a que las consideraciones económicas de las operaciones de fundición son tan importantes como sus aspectos técnicos, este capítulo también resume brevemente los factores económicos básicos que son relevantes para las operaciones de fundición.

12.2 Consideraciones de diseño en la fundición

De igual manera que en todas las operaciones de manufactura, durante muchos años también se han desarrollado ciertos *principios de diseño* relativos a la fundición. Aunque estos principios se establecieron principalmente a través de la experiencia, los métodos de análisis, la simulación de procesos y el modelado y el diseño asistidos por computadora, así como las técnicas de manufactura, se han comenzado a usar de manera amplia, mejorando la calidad de las fundiciones y su productividad, lo que resulta en un importante ahorro en costos.

Todos los procesos de fundición comparten algunas características básicas. En consecuencia, existen consideraciones de diseño que se aplican de igual manera, por ejemplo, a la fundición en arena y a la fundición en dado; sin embargo, cada proceso tendrá sus propias consideraciones de diseño particulares. La fundición en arena requerirá conside-

rar la erosión del molde y las inclusiones de arena asociadas con la fundición, mientras que la fundición en dado no generará estas preocupaciones, aunque provoca otras, como el agrietamiento en caliente de los dados que reduce su vida de servicio.

Eliminar las causas de los defectos en los productos de fundición suele ser complicado, así que el propósito de las consideraciones presentadas en este capítulo sólo es servir como pautas. Además, con frecuencia los defectos son aleatorios y pueden ser difíciles de reproducir, lo que complica la aplicación de medidas correctivas. En la mayoría de los casos, el diseño de un determinado tipo de molde producirá sobre todo piezas buenas, pero también algunas defectuosas. Por estas razones, se implementan procedimientos estrictos de control de calidad, especialmente para aplicaciones críticas (consulte el capítulo 36).

12.2.1 Consideraciones generales de diseño para las fundiciones

Existen dos tipos de problemas de diseño en las fundiciones: (a) las características geométricas, tolerancias, etc., que deben incorporarse en la pieza, y (b) las características del molde que se requiere para producir la fundición deseada. Por lo general, el diseño robusto de una fundición incluye los siguientes pasos:

1. Diseñar la pieza de modo que la forma se funda tan fácilmente como sea posible. En este capítulo se presentan varias consideraciones de diseño para ayudar en estos esfuerzos.
2. Seleccionar un proceso de fundición y un material adecuado para la pieza, el tamaño, la cantidad de producción requerida, las propiedades mecánicas, etc. A menudo, los pasos 1 y 2 de esta lista deben especificarse al mismo tiempo, lo que puede ser un reto de diseño demandante.
3. Localizar la línea de partición del molde en la pieza.
4. Diseñar y ubicar los canales de alimentación que permitan el suministro uniforme de metal fundido en la cavidad del molde.
5. Seleccionar una geometría adecuada para el funcionamiento del sistema.
6. Ubicar los componentes del molde, como el bebedero, las protecciones y mazarotas según corresponda.
7. Asegurar la existencia de controles adecuados y el seguimiento de buenas prácticas.

Diseño de las piezas a fundir. Las siguientes consideraciones son importantes en el diseño de fundiciones, como se indica en la figura 12.1:

1. **Esquinas, ángulos y espesores de sección.** Esquinas agudas, ángulos y biseles deben evitarse tanto como sea posible porque actúan como elevadores del esfuerzo y pueden causar agrietamiento y fractura del metal (así como de los dados) durante la solidificación. Los radios del bisel deben seleccionarse para minimizar las concentraciones de esfuerzo y asegurar el adecuado flujo del metal fundido durante el vaciado. Los radios de los biseles normalmente están en un rango de 3 a 25 mm (1/8 a 1 pulg), aunque se pueden admitir radios menores en pequeñas fundiciones y aplicaciones específicas. Por otro lado, si los radios del bisel son demasiado grandes, el volumen del material en esas regiones también será grande y, por lo tanto, menor la velocidad de enfriamiento.

En las fundiciones, los cambios de sección deben unirse suavemente entre sí. La ubicación del círculo mayor que pueda inscribirse en una región particular (figuras 12.2a y b) es crítica en virtud de su influencia sobre las cavidades por contracción. Debido a que la velocidad de enfriamiento en las regiones con círculos más grandes es más baja, estas regiones se llaman **puntos calientes** y pueden causar **cavidades por contracción** y **porosidad** (figuras 12.2c y d).

En los puntos calientes, las cavidades pueden eliminarse usando corazones pequeños, y aunque producen orificios con corazón en la fundición (figura 12.2e), éstos no afectan significativamente la resistencia. También es importante tratar de mantener las secciones transversales y los espesores de pared uniformes en toda la fundición con el fin de evitar o reducir al mínimo las cavidades por contracción. A pesar de que aumentan el costo de producción, los *rellenos metálicos* o *enfriadores* en el molde pueden eliminar o reducir al mínimo los puntos calientes (vea la figura 10.14).

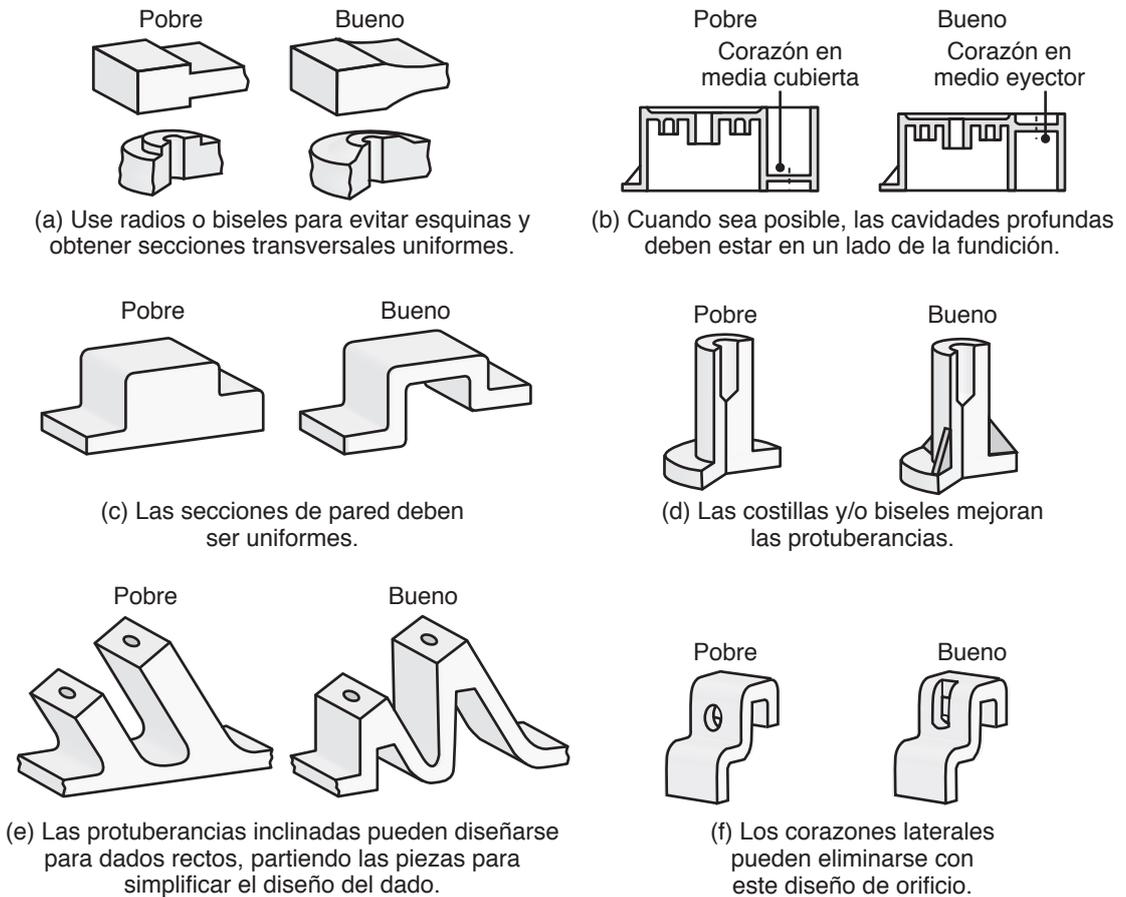


FIGURA 12.1 Modificaciones de diseño sugeridas para evitar defectos en las piezas fundidas. Fuente: Imágenes proporcionadas por: North American Die Casting Association, Wheeling, Illinois.

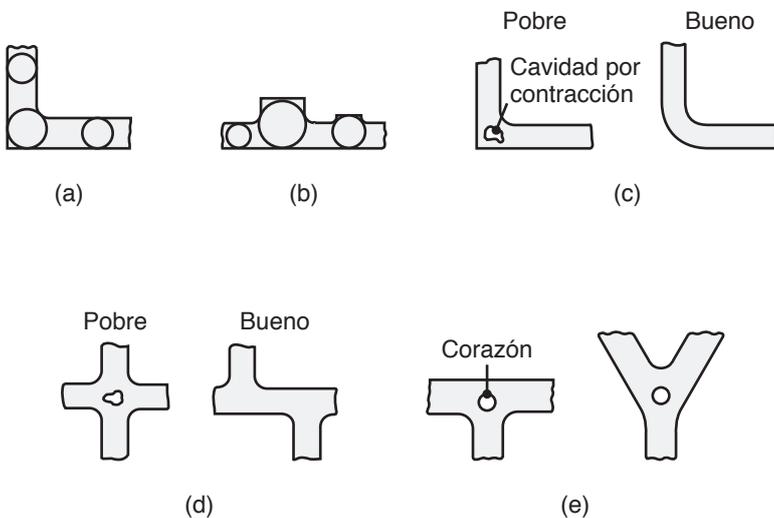


FIGURA 12.2 Ejemplos de diseños que muestran la importancia de mantener secciones transversales uniformes en las fundiciones para evitar puntos calientes y cavidades por contracción.

2. **Áreas planas.** Se deben evitar las áreas grandes lisas (superficies planas) porque (a) se pueden deformar durante el enfriamiento debido a los gradientes de temperatura o (b) pueden provocar un mal acabado superficial debido al flujo irregular del metal durante la fundición. Una de las técnicas más comunes para evitar estos problemas consiste en romper las superficies planas con costillas escalonadas y dientes de sierra, como se describe a continuación.
3. **Costillas.** Un método para producir piezas de espesor uniforme consiste en eliminar los grandes volúmenes en la fundición, como se muestra en la figura 12.1. Sin embargo, esto puede resultar en una pérdida de rigidez y, en especial con las regiones planas, puede conducir a una deformación. Una solución a estos problemas es el uso de costillas o estructuras de soporte en la pieza fundida, como se muestra en la figura 12.3. Estos elemen-

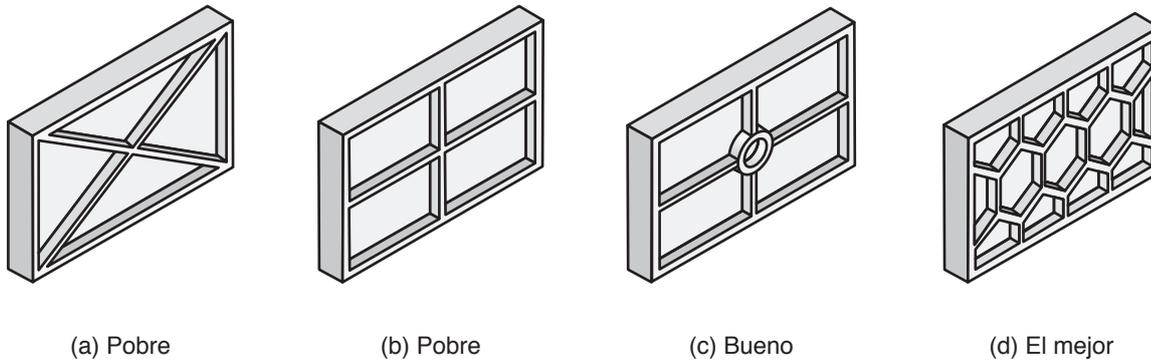


FIGURA 12.3 Diseños de costilla para su uso en secciones delgadas o superficies planas con el fin de reducir o eliminar distorsiones.

tos suelen colocarse sobre la superficie menos visible. Por lo general, las costillas deben tener un espesor aproximado al 80% del grosor del miembro al que se adjuntan y deben ser más profundas que el grosor de sus puntales. A menudo resulta benéfico que las costillas se solidifiquen antes que los miembros a los que se adjuntan. La incorporación de costillas no debe utilizarse en ambos lados de una fundición y éstas no deben encontrarse en ángulos agudos a causa de las complicaciones del moldeo.

4. **Contracción.** Para evitar que la fundición se agriete durante el enfriamiento, deberán existir tolerancias para la contracción durante la solidificación y/o el enfriamiento a temperatura ambiente. En las fundiciones con costillas de refuerzo que se intersecan, los esfuerzos de tensión desarrollados pueden reducirse mediante el escalonamiento de las costillas o un cambio en la geometría de la intersección. Las dimensiones del modelo también deben permitir la contracción del metal durante la solidificación y el enfriamiento. Las tolerancias para la contracción, conocidas como **tolerancias de contracción del fabricante de modelos**, suelen ser de entre 10 y 20 mm/m (1/8 y 1/4 pulg/pie). En la tabla 12.1 se proporcionan las tolerancias de contracción normales para los metales que se funden comúnmente en arena.
5. **Ángulo de salida.** Por lo general, en los modelos para molde de arena, se proporciona un pequeño ángulo de salida (ahusamiento) con el fin de permitir la salida del modelo sin dañar el molde (vea la figura 11.5). Los ángulos de salida varían generalmente entre 5 y 15 mm/m (1/16 y 3/16 pulg/pie). Dependiendo de la calidad del modelo, los ángulos de salida suelen variar entre 0.5 y 2°. De manera típica, los ángulos sobre las superficies interiores son el doble del valor; deben ser mayores que los de las superficies exteriores debido a que, a medida que la pieza fundida se enfría, se contrae hacia el interior, es decir, hacia el corazón.
6. **Tolerancias dimensionales.** Las tolerancias dimensionales dependen del proceso particular de fundición empleado, del tamaño de la fundición y del tipo de modelo que se utilice. La tolerancia debe ser tan amplia como sea posible dentro de los límites del buen desempeño de la pieza; en caso contrario, el costo de la fundición aumenta. En la práctica comercial, las tolerancias se encuentran típicamente en el rango de ± 0.8 mm (1/32 pulg) para las fundiciones pequeñas y aumentan con el tamaño de las piezas de fundición. Por ejemplo, en fundiciones grandes las tolerancias pueden ser hasta de ± 6 mm (0.25 pulg).
7. **Inscripciones y marcas.** Una práctica común consiste en incluir alguna forma de identificación en la pieza fundida, como letras, números o logotipos de empresas. Estas características pueden estar grabadas en la fundición o sobresalir de su superficie; la selección de dichas formas de identificación depende del méto-

TABLA 12.1

Tolerancia normal de contracción para algunos metales fundidos en moldes de arena

Metal	Holgura de contracción (%)
Hierros fundidos	
Hierro fundido gris	0.83-1.3
Hierro fundido blanco	2.1
Hierro fundido maleable	0.78-1.0
Aleaciones de aluminio	1.3
Aleaciones de magnesio	1.3
Aleaciones de cobre	
Latón amarillo	1.3-1.6
Bronce fosforado	1.0-1.6
Bronce al aluminio	2.1
Acero al alto manganeso	2.6

do de producción de los moldes. Por ejemplo, en la fundición en arena se produce una placa en el modelo y se maquina con una fresadora de control numérico por computadora (sección 24.2) ya que resulta más sencillo maquinar letras en la placa del modelo. Por otro lado, en la fundición en dado es más sencillo maquinar las letras en el molde.

8. **Operaciones de acabado.** En el diseño de una fundición, es importante considerar el mecanizado y acabado posteriores, si éstos son necesarios. Por ejemplo, si en una fundición debe generarse un orificio con un taladro, lo mejor es ubicar el orificio sobre una superficie plana en vez de en una superficie curva con el fin de evitar que el taladro se deslice. Un diseño aún mejor sería incorporar un hoyuelo pequeño en la superficie curva como punto de partida para la operación de taladrado. Las fundiciones también pueden incluir características que permitan fijarlas fácilmente en máquinas herramientas cuando requieren operaciones de maquinado secundarias.

Selección del proceso de fundición. Los procesos de fundición no se pueden seleccionar independientemente de las consideraciones económicas, como se describe en la sección 12.4. La tabla 11.1 lista algunas de las ventajas y limitaciones de los procesos que tienen un impacto en el diseño de la fundición.

Ubicación de la línea de partición. En un molde, la pieza debe orientarse de modo que la porción grande de la fundición sea relativamente baja y la altura de la pieza se reduzca al mínimo. La orientación de la pieza también determina la distribución de la porosidad. Por ejemplo, en la fundición de aluminio, el hidrógeno es soluble en el metal líquido, pero no es soluble cuando el aluminio se solidifica (vea la figura 10.15). Por lo tanto, durante la fundición del aluminio, se forman burbujas de hidrógeno que se elevan debido a la flotabilidad y causan una porosidad mayor en las regiones superiores de las fundiciones; las superficies críticas deben estar orientadas de modo que se posicionen hacia abajo.

Entonces, una fundición orientada correctamente puede tener la línea de partición especificada; la línea de partición es la línea o plano que separa las mitades superior e inferior de los moldes (vea la figura 11.4.) En general, la línea de partición debe estar a lo largo del plano en vez de formar un contorno. Siempre que sea posible, la línea de partición debe ubicarse en las esquinas o bordes de las fundiciones, no en superficies planas del centro de la pieza, de modo que la **rebaba** que se genere en la **línea de partición** (material que se fuga entre las dos mitades del molde) no sea muy visible. La ubicación de la línea de partición es importante puesto que influye en el diseño del molde, la facilidad de moldeo, el número y forma de los corazones requeridos, el método de apoyo y el sistema de llenado.

La línea de partición debe colocarse tan abajo como sea posible (en relación con la fundición) para los metales menos densos (por ejemplo, aleaciones de aluminio) y ubicarse alrededor de la altura media para metales más densos (como los aceros). Sin embargo, no debe permitirse que el metal fundido fluya verticalmente, sobre todo cuando no se encuentra restringido por un bebedero. La ubicación de la línea de partición tiene un gran efecto sobre el resto del diseño del molde; por ejemplo, en la fundición en arena, es típico que los canales de alimentación, las compuertas y el bebedero se ubiquen todos en el molde inferior sobre la línea de partición. Además, la ubicación de la línea de partición y la orientación de la pieza determinan el número de corazones requeridos, especialmente cuando es preferible evitar el uso de corazones siempre que resulte práctico.

Localización y diseño de compuertas. Las compuertas son las conexiones entre los canales de alimentación y la pieza que será fundida. Algunas consideraciones en el diseño de los sistemas de alimentación son:

- A menudo se prefieren compuertas múltiples, las cuales son necesarias para piezas grandes. Entre los beneficios de las compuertas múltiples están la disminución de la temperatura de vaciado y la reducción de los gradientes de temperatura en la fundición.
- Las compuertas deben alimentar a las secciones gruesas de la fundición.

- Cuando una compuerta colinda con una fundición debe usarse un filete o bisel; esta característica produce menos turbulencia en las uniones abruptas.
- La compuerta más cercana al bebedero debe colocarse lo más alejada posible de éste, de manera que la compuerta pueda eliminarse fácilmente. Esta distancia puede ser de tan sólo unos cuantos milímetros en las fundiciones pequeñas y de hasta 500 mm en las grandes.
- La longitud mínima de la compuerta debe ser de tres a cinco veces su diámetro, dependiendo del metal que será fundido. La sección transversal de la compuerta debe ser lo suficientemente grande como para permitir el llenado de la cavidad del molde y debe ser menor que la sección transversal del canal de alimentación.
- Deben evitarse las compuertas curvas; cuando sean necesarias, se debe ubicar una sección recta en la compuerta inmediatamente adyacente a la fundición.

Diseño del canal de alimentación. El canal de alimentación es un canal de distribución horizontal que recibe el metal fundido desde el bebedero y lo entrega a las compuertas. Los canales de alimentación se utilizan para atrapar la escoria (una mezcla de óxido y metal que se forma sobre la superficie de los metales) y evitar que entre en las compuertas y en la cavidad del molde. Comúnmente, las trampas para escoria se ubican en los extremos de los canales y éstos se proyectan por encima de las compuertas para garantizar que el metal en las mismas se extraiga por debajo de la superficie. Para las piezas simples se usa un solo canal, pero en fundiciones más complicadas pueden requerirse sistemas de dos canales.

Diseño de diversas características del molde. En el diseño de un *bebedero* (descrito en la sección 10.3), el objetivo principal es lograr las velocidades de flujo requeridas en el metal fundido, al mismo tiempo que se evita la aspiración (arrastre de aire) o la excesiva formación de desperdicios. Las velocidades de flujo se determinan de modo que se evite la turbulencia, pero de tal manera que el molde se llene rápidamente en comparación con el tiempo de solidificación requerido. Para garantizar que en el bebedero el flujo de metal no se vea interrumpido, puede usarse una *copa de vaciado*; asimismo, si el metal fundido se mantiene en la copa de vaciado durante la fundición, la escoria flotará y no entrará en la cavidad del molde. Para atrapar contaminantes de gran tamaño se utilizan *filtros*, que también sirven para reducir la velocidad del metal y hacer que el flujo sea más laminar. Se pueden utilizar *enfriadores* para acelerar la solidificación del metal en una región particular de una pieza de fundición.

Establecimiento de buenas prácticas. Se ha observado ampliamente que cierto diseño de molde puede producir piezas aceptables, así como defectuosas, y rara vez se producen sólo fundiciones buenas o sólo fundiciones defectuosas. Para comprobar si existen piezas defectuosas, se requieren procedimientos de control de calidad. Algunas preocupaciones comunes son:

- Iniciar con un metal fundido de alta calidad resulta esencial para la producción de fundiciones de calidad superior. La temperatura de vaciado, la composición química de los metales, el arrastre de gas y los procedimientos de manejo pueden afectar la calidad del metal que se vacía en un molde.
- El vaciado de metal no debe ser interrumpido porque una interrupción puede conducir al arrastre de escoria y a turbulencia. En la cavidad del molde, el menisco del metal fundido debe experimentar un avance continuo, ininterrumpido y ascendente.
- Las diferentes velocidades de enfriamiento causan esfuerzos residuales en el cuerpo de una fundición, por lo que puede requerirse un relevado de esfuerzos (sección 4.11) para evitar distorsiones de la fundición en aplicaciones críticas.

12.2.2 Diseño para fundición de molde desechable

Los procesos de molde desechable tienen ciertos requisitos de diseño específicos que implican principalmente el material del molde, el tamaño de las piezas y el método de manufactura. Tenga en cuenta que una fundición en un proceso de molde desechable (por

ejemplo una fundición por revestimiento) se enfría mucho más lentamente de lo que lo haría, por ejemplo, una fundición en dado. Esto tiene importantes implicaciones en el diseño de moldes. Algunas consideraciones de diseño importantes para la fundición de molde desechable son:

Distribución del molde. En el molde, las características deben colocarse de manera compacta y lógica utilizando las compuertas que sean necesarias. Uno de los objetivos más importantes en el diseño del molde es que la solidificación inicie en un extremo del molde y progrese en un frente uniforme a través de la fundición, con las mazarotas solidificándose al final. Tradicionalmente, la distribución del molde se ha basado en la experiencia y en consideraciones del flujo del fluido y de la transferencia de calor. En la actualidad, hay muchos programas comerciales de computadora que ayudan en el análisis del flujo del fluido y de la transferencia de calor en las fundiciones. Estos programas simulan el llenado del molde y permiten la evaluación y el diseño rápido de las disposiciones para el molde.

Diseño de la mazarota. Una preocupación importante en el diseño de fundiciones es el tamaño de las mazarotas y su ubicación. Las mazarotas son muy útiles para afectar el progreso del frente de solidificación a través de una fundición, el cual se describió líneas arriba, y representan un elemento esencial en el diseño del molde. Las mazarotas ciegas implican buenas características de diseño y mantienen el calor por más tiempo de lo que lo hacen las mazarotas abiertas.

Las mazarotas se diseñan de acuerdo con las siguientes reglas básicas:

1. La mazarota no debe solidificar antes de que lo haga la fundición. Esta regla general se cumple al evitar el uso de mazarotas pequeñas y al utilizar mazarotas cilíndricas con relaciones de aspecto pequeñas (es decir, relaciones pequeñas de la altura sobre la sección transversal). Las mazarotas esféricas representan la forma más eficiente, pero es difícil trabajar con ellas.
2. El volumen de la mazarota debe ser lo más grande posible para proporcionar una cantidad suficiente de metal fundido que compense la contracción en la fundición.
3. Las uniones entre la fundición y la mazarota no deben desarrollar puntos calientes donde pueda presentarse porosidad.
4. Las mazarotas deben ubicarse de tal modo que el metal fundido pueda enviarse a los sitios donde más se necesite.
5. Debe haber suficiente presión en el molde para conducir el metal fundido hacia los lugares donde se requiere. Por lo tanto, las mazarotas no son muy útiles para los metales con baja densidad (como las aleaciones de aluminio) como lo son para los metales con mayor densidad (como acero y hierro fundido).
6. La presión ejercida desde la mazarota debe evitar la formación de cavidades y fomentar el llenado completo de la cavidad del molde.

Tolerancias en el maquinado. La mayoría de las fundiciones en molde desechable requieren algunas operaciones de acabado adicionales, como maquinado y esmerilado; por lo tanto, en el diseño deben ser consideradas tolerancias de fundición para estas operaciones. Las tolerancias en el maquinado, que se incluyen en las dimensiones del modelo, dependen del tipo de operación de fundición y aumentan con el tamaño y espesor de la sección de la pieza fundida. Por lo general, las tolerancias oscilan en un rango de 2 a 5 mm (0.1 a 0.2 pulg) para fundiciones pequeñas hasta más de 25 mm (1 pulg) para fundiciones grandes.

12.2.3 Diseño para la fundición en molde permanente

Los **lineamientos** típicos para el diseño de fundiciones en molde permanente se analizan en el ejemplo 12.1. Comúnmente, en el diseño de herramientas para la fundición en dado se incluyen consideraciones especiales. Aunque los diseños pueden modificarse con el fin de eliminar el ángulo de salida y obtener mayor precisión dimensional, normalmente se requiere un ángulo de inclinación de 0.5° o incluso 0.25° ; de lo contrario, podría ocurrir

un agarre (adhesiones o atasques localizados de dos superficies, sección 33.5) entre la pieza y los dados, lo cual causaría distorsión de la fundición. Las piezas de metal fundido tienen una forma casi neta, por lo general sólo requieren el retiro de las compuertas y un pequeño recorte para eliminar rebabas y otros defectos menores. El acabado superficial y la precisión dimensional de las piezas fundidas en dado suelen ser muy buenos (vea la tabla 11.2) y, en general, no requieren tolerancia en la operación de maquinado.

CASO DE ESTUDIO 12.1 Ejemplos ilustrativos de fundiciones con diseños pobres y buenos

En la figura 12.4 se ilustran varios ejemplos de diseños pobres y buenos de fundiciones en molde permanente. A continuación se presenta un resumen de las diferencias en el diseño para cada ejemplo:

- (a) La parte inferior del diseño de la izquierda tiene una pared delgada sin ninguna función aparente. Esta ubicación de la pieza puede fracturarse si se le somete a grandes fuerzas o altos impactos. Un buen diseño elimina este problema y puede simplificar la fabricación del dado y el molde.
- (b) Las superficies planas grandes presentan siempre dificultades en la fundición de metales (así como en la fundición de materiales no metálicos que se describe en la parte III) porque tienden a defor-

marse y a desarrollar superficies irregulares. Una práctica común para evitar esta situación consiste en dividir la superficie con costillas (vea la figura 12.3) y aserraduras en el lado opuesto de la fundición. Este enfoque reduce en gran medida la distorsión, en tanto que no afecta la apariencia y la función de la superficie plana. Además de las costillas, resulta benéfico utilizar una superficie texturizada, como se muestra en la figura 12.4b, puesto que las superficies muy lisas son difíciles de fundir sin objetar las características de belleza y arte del proceso.

- (c) Este ejemplo de un diseño pobre y bueno es relevante no sólo para fundiciones, sino también

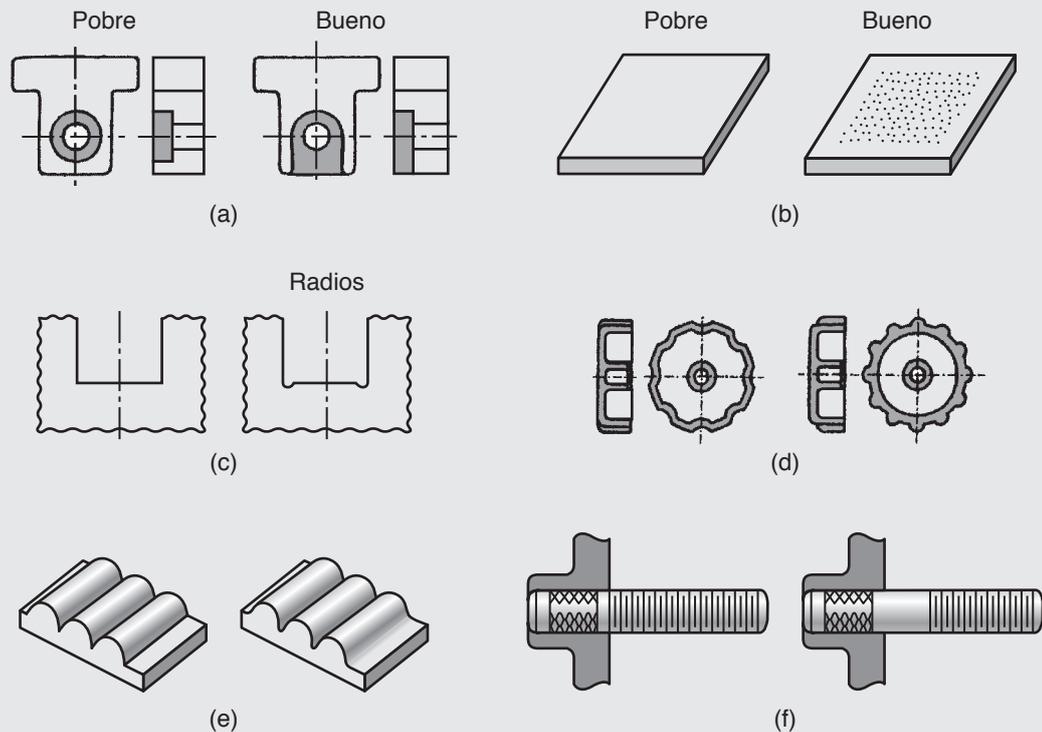


FIGURA 12.4 Ejemplos de diseños de fundición indeseables (pobres) y deseables (buenos). Fuente: Imágenes proporcionadas por: North American Die Casting Association, Wheeling Illinois.

(continúa)

para piezas maquinadas o rectificadas. Es difícil producir radios internos o esquinas agudas que puedan ser necesarios para propósitos funcionales, como insertos diseñados para llegar a la parte inferior de la cavidad de la pieza. También, en el caso de cavidades lubricadas, el lubricante puede acumularse en la parte inferior y, como no es comprimible, impedir la introducción completa de un inserto. La colocación de un pequeño radio de curvatura en las esquinas o en la periferia de la parte inferior de la pieza elimina este problema.

- (d) Una parte podría funcionar, por ejemplo, como una perilla que pudiera agarrarse y rotarse; dadas las características exteriores a lo largo de su periferia. Observe en el diseño de la izquierda que la periferia interna de la perilla también tiene características que no son funcionales pero ayudan a ahorrar material. El dado para el diseño correcto es más fácil de fabricar.

(e) Note que el diseño indeseable (pobre) tiene perfiles agudos en la base de las ranuras longitudinales, lo cual significa que el dado tiene salientes agudos (filo de cuchillo). Por lo tanto, es posible que, con un uso exagerado del dado, estos bordes puedan astillarse.

- (f) El diseño indeseable o pobre de la izquierda tiene cuerdas que llegan a la cara derecha de la fundición. Entonces, es posible que un poco de metal fundido penetre en esta región durante la fundición, formando una viruta e interfiriendo con la función del inserto roscado, como cuando se utiliza una tuerca. El diseño correcto (bueno) incorpora un desplazamiento de la barra roscada, lo cual elimina este problema. Esta consideración de diseño también es aplicable para el moldeo por inyección de plásticos, en la figura 19.9 se muestra un ejemplo.

12.2.4 Modelado de procesos de fundición por computadora

Debido a que la fundición implica interacciones complejas entre diferentes variables del proceso y de los materiales, un estudio cuantitativo de estas interacciones resulta esencial para el diseño adecuado y la producción adecuada de piezas de fundición de alta calidad. El rápido avance en equipos y técnicas de modelado ha dado lugar a importantes innovaciones en el modelado de los procesos de fundición. Éstas incluyen el flujo del fluido, la transferencia de calor y las microestructuras desarrolladas durante la solidificación bajo diferentes condiciones de fundición.

El modelado del *flujo del fluido* en los moldes se basa en las ecuaciones de Bernoulli y de continuidad (sección 10.3). Un modelo predice el comportamiento del metal fundido durante el vaciado en el sistema de alimentación y su recorrido hacia la cavidad del molde, así como las distribuciones de velocidad y presión en los moldes. Los nuevos paquetes computacionales pueden acoplar el flujo del fluido y la *transferencia de calor*, junto con los efectos de tales parámetros como las condiciones superficiales (rugosidad, permeabilidad del molde, etc.), las propiedades térmicas de los materiales involucrados y la convección natural y la forzada por la velocidad de enfriamiento. Recuerde que las condiciones superficiales varían durante la solidificación a medida que se desarrolla una capa de aire entre la fundición y la pared del molde por causa de la contracción. Se han llevado a cabo estudios similares sobre el modelado del desarrollo de *microestructuras* en la fundición. Estos estudios abarcan el flujo de calor, los gradientes de temperatura, la nucleación y el crecimiento de cristales, la formación de estructuras dendríticas y equiaxiales, la incidencia de los granos entre sí y el movimiento de la interfase líquido-sólido durante la solidificación. En la actualidad, existen varios programas de software comercial, como Magmasoft, SOLIDCast, CAP, Novaflow, Flow 3-D, WinCast y Star-Cast, para el modelado de procesos de fundición.

Los modelos son capaces de predecir, por ejemplo, el ancho de la zona blanda o pastosa (vea la figura 10.4) durante la solidificación y el tamaño de grano en las piezas de fundición. De igual modo, la capacidad para calcular isoterma (líneas de igual temperatura) proporciona una idea de posibles puntos calientes y el posterior desarrollo de cavidades por contracción. Con la disponibilidad de paquetes computacionales amigables con el usuario y los avances en el diseño y la manufactura asistidos por computadora (capítulo 38), las técnicas de modelado son cada vez más fáciles de implementar. Entre los beneficios de este enfoque están la mejora en calidad, una planeación más sencilla y estimación de costos, aumentos en la productividad y una respuesta más rápida ante modificaciones de diseño.

12.3 Aleaciones para las fundiciones

Las propiedades generales y las aplicaciones de aleaciones y metales ferrosos y no ferrosos se presentaron en los capítulos 5 y 6, respectivamente. En esta sección describimos las propiedades y aplicaciones de la fundición de metales y aleaciones; sus propiedades y características de fundición y manufactura se resumen en la figura 12.5 y en las tablas de la 12.2 a la 12.5. Además de sus características de fundición, otras consideraciones importantes en la fundición de aleaciones incluyen su maquinabilidad y soldabilidad, puesto que las aleaciones suelen ensamblarse con otros componentes para producir la pieza completa.

La aleación de fundición que se utiliza con mayor frecuencia (por su tonelaje) es el hierro gris, seguido por el hierro dúctil, aluminio, zinc, plomo, cobre, hierro maleable y magnesio. Los embarques de fundiciones, sólo en Estados Unidos, representan alrededor de 13 millones de toneladas al año.

12.3.1 Aleaciones para fundiciones no ferrosas

Aleaciones base aluminio. Las aleaciones de aluminio tienen un amplio rango de propiedades mecánicas debido, principalmente, a los diversos mecanismos de endurecimiento y tratamientos térmicos que pueden utilizarse (sección 4.9). Las piezas hechas de aleaciones de aluminio y magnesio se conocen como fundiciones de **metal ligero**. Estas aleaciones tienen alta conductividad eléctrica y generalmente buena resistencia a la corrosión atmosférica; sin embargo, su resistencia a algunos ácidos y agentes alcalinos es baja y se debe tener cuidado con el fin de evitar la corrosión galvánica. Las aleaciones de aluminio son de peso ligero, no tóxicas y tienen buena maquinabilidad. Con excepción de las que contienen silicio, las aleaciones de aluminio suelen tener baja resistencia al desgaste y a la abrasión. Las aleaciones base aluminio tienen numerosas aplicaciones, incluyendo usos arquitectónicos y decorativos. Una tendencia creciente es su uso en automóviles, en componentes como los monoblocks de motor, cabezales de cilindro, múltiples de admisión, cajas de transmisión, componentes de la suspensión, ruedas y frenos.

Aleaciones base magnesio. La densidad más baja de todas las aleaciones de fundición comerciales pertenece al grupo de aleaciones base magnesio, las cuales tienen buena resistencia a la corrosión y resistencia moderada, dependiendo del tratamiento térmico particular utilizado. Las aplicaciones típicas incluyen ruedas de automóvil, carcasas y monoblocks de motor enfriados por aire. Debido a que son ligeras, las piezas fundidas de magnesio se utilizan cada vez más en los automóviles para aumentar el ahorro de combustible.

Aleaciones base cobre. Las ventajas de las aleaciones base cobre son su buena conductividad eléctrica y térmica, su resistencia a la corrosión y no ser tóxicas, así como su resistencia al desgaste, lo que las hace adecuadas como materiales para rodamientos. Existe una amplia variedad de aleaciones base cobre, incluyendo latones, bronce al aluminio, bronce fosforado y bronce al estaño.

Aleaciones base zinc. Un grupo de aleaciones base zinc con bajo punto de fusión tiene buena resistencia a la corrosión, buena fluidez y resistencia suficiente para las aplicaciones estructurales. Estas aleaciones se utilizan por lo general en la fundición en dado, especialmente para piezas con formas complicadas y paredes delgadas.

Aleaciones base estaño. Aunque son de baja resistencia, estas aleaciones tienen buena resistencia a la corrosión y se utilizan típicamente para revestimientos o superficies de soporte en rodamientos.

Aleaciones base plomo. Estas aleaciones tienen aplicaciones similares a las aleaciones base estaño, pero la toxicidad del plomo es un gran inconveniente para una aplicación más amplia.

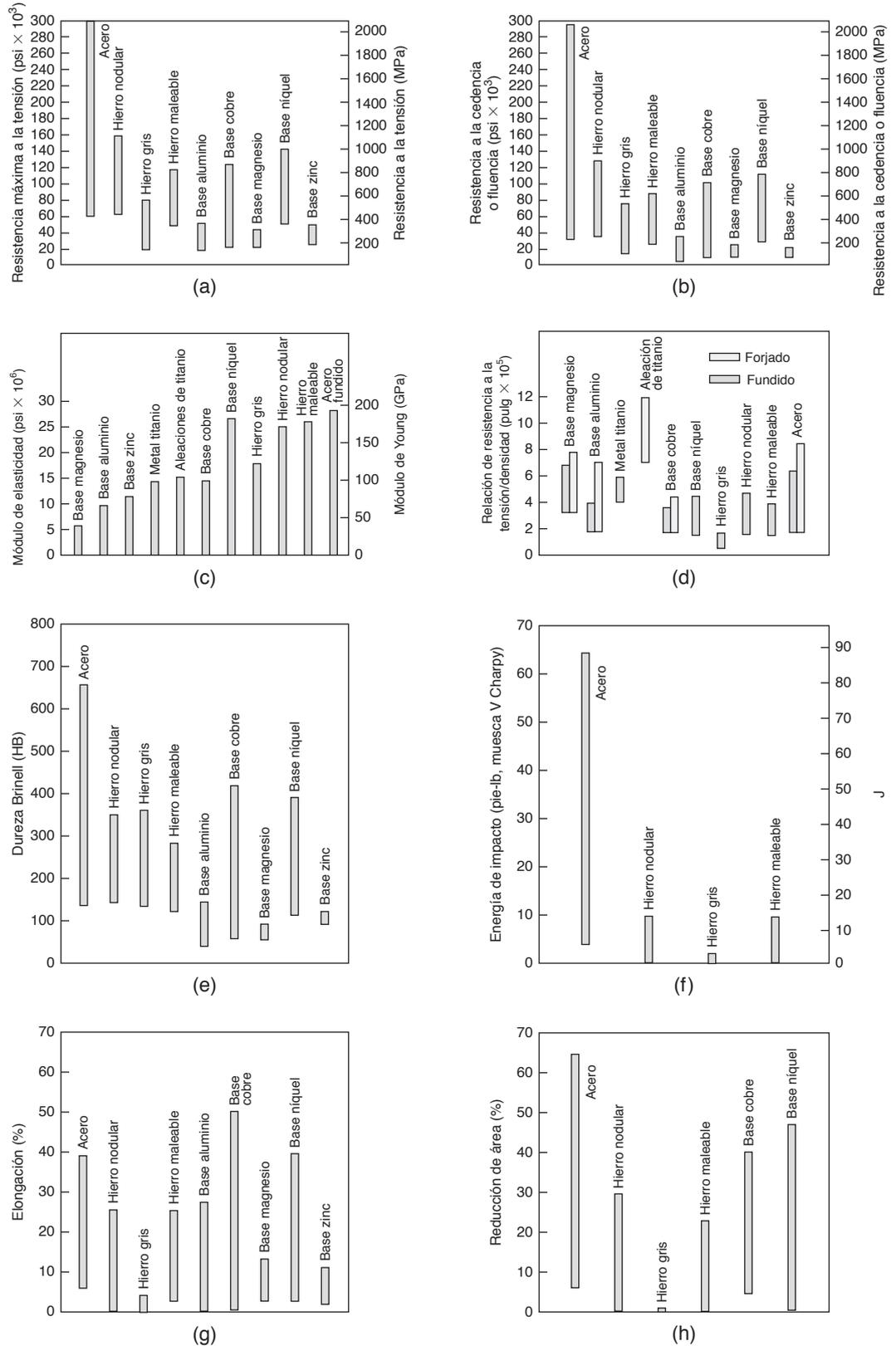


FIGURA 12.5 Propiedades mecánicas para diferentes grupos de aleaciones de fundición; observe que incluso dentro del mismo grupo, las propiedades varían en un amplio intervalo, en particular para los aceros fundidos. Fuente: Cortesía de la Steel Founder's Society of America.

TABLA 12.2

Aplicaciones típicas para las fundiciones y características de la fundición					
Tipo de aleación	Capacidad para fundirse*	Soldabilidad	Maquinabilidad*	Aplicaciones típicas	
Aluminio	E	R	B-E	Pistones, carcasas de embrague, múltiples de admisión.	
Cobre	R-B	R	R-B	Bombas, válvulas, engranes, hélices marinas.	
Hierro					
Dúctil	B	D	B	Cigüeñales, engranes para servicio pesado.	
Gris	E	D	B	Monoblocks para motor, engranes, discos y tambores de freno, bancadas para maquinaria.	
Hierro maleable	B	D	B	Maquinaria para la agroindustria y la construcción, cojinetes de servicio pesado, carros de ferrocarril.	
Hierro blanco	B	MP	MP	Carcasa protectora para molinos de mineral, boquillas de granallado, zapatas de freno para ferrocarril, trituradoras y pulverizadoras.	
Magnesio	B-E	B	E	Cárter del motor, cajas de transmisión.	
Níquel	R	R	R	Álabes de turbinas a gas, componentes de bomba y válvulas para plantas químicas.	
Acero					
al carbono y de baja aleación	R	E	R	Bloques de dado, engranes para servicio pesado, miembros del tren de aterrizaje de aviones, ruedas de ferrocarril.	
de alta aleación	R	E	R	Carcasas de turbinas a gas, componentes de bomba y válvulas, quijadas trituradoras de roca.	
Zinc	E	D	E	Manijas para puertas, rejillas de radiador.	

*E = Excelente; B = Buena; R = Regular; MP = Muy pobre; D = Difícil.

TABLA 12.3

Propiedades y aplicaciones típicas de los hierros fundidos					
Hierro fundido	Tipo	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia o fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones típicas
Gris	Ferrítico	170	140	0.4	Tubería, equipo sanitario.
	Perlítico	275	240	0.4	Monoblocks de motor, máquinas herramientas.
	Martensítico	550	550	0	Superficies de desgaste.
Dúctil (nodular)	Ferrítico	415	275	18	Tubería, servicios generales.
	Perlítico	550	380	6	Cigüeñales, piezas sometidas a grandes esfuerzos.
	Martensita revenida	825	620	2	Piezas de máquina de alta resistencia, piezas resistentes al desgaste.
Maleable	Ferrítico	365	240	18	Hardware, accesorios de tubería, servicio de ingeniería en general.
	Perlítico	450	310	10	Equipo ferroviario, acoplamientos.
	Martensita revenida	700	550	2	Equipo ferroviario, engranes, bielas.
Blanco	Perlítico	275	275	0	Piezas resistentes al desgaste, rodillos para molinos de laminación.

Aleaciones para alta temperatura. Las aleaciones para alta temperatura tienen una amplia gama de propiedades y, por lo general, se requieren temperaturas de hasta 1650 °C (3000 °F) para las fundiciones de titanio y las superaleaciones, incluso aún más altas en aleaciones refractarias (Mo, Nb, W y Ta). Se utilizan técnicas especiales en la fundición de estas aleaciones para boquillas y diversos componentes de motores de jet y cohetes. Algunas aleaciones de alta temperatura son más convenientes y económicas para la fun-

TABLA 12.4

Propiedades mecánicas de los hierros fundidos grises				
Clase ASTM	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Dureza (HB)
20	152	572	66-97	156
25	179	669	79-102	174
30	214	752	90-113	210
35	252	855	100-119	212
40	293	965	110-138	235
50	362	1130	130-157	262
60	431	1293	141-162	302

TABLA 12.5

Propiedades y aplicaciones típicas de las aleaciones de fundiciones no ferrosas					
Aleaciones (UNS)	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia o fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones típicas
Aleaciones de aluminio					
195 (AO1950)	Tratada térmicamente	220-280	110-220	8.5-2	Fundiciones en arena.
319 (AO3190)	Tratada térmicamente	185-250	125-180	2-1.5	Fundiciones en arena.
356 (AO3560)	Tratada térmicamente	260	260	5	Fundiciones en molde permanente.
Aleaciones de cobre					
Latón rojo (C83600)	Recocido	235	115	25	Conectores de tubería, engranes.
Latón amarillo (C86400)	Recocido	275	95	25	Hardware, ornamentales.
Bronce al manganeso (C86100)	Recocido	480	195	30	Ejes de propulsor, aspas.
Bronce al estaño con plomo (C92500)	Recocido	260	105	35	Engranes, cojinetes, válvulas.
Metal para cañón (C90500)	Recocido	275	105	30	Piezas de bomba, accesorios.
Plata al níquel (C97600)	Recocido	275	175	15	Piezas marinas, válvulas.
Aleaciones de magnesio					
AZ91A	F	230	150	3	Fundiciones en dado.
AZ63A	T4	275	95	12	Fundiciones en molde de arena y molde permanente.
AZ91C	T6	275	130	5	Piezas de alta resistencia.
EZ33A	T5	160	110	3	Piezas para temperaturas elevadas.
HK31A	T6	210	105	8	Piezas para temperaturas elevadas.
QE22A	T6	275	205	4	Piezas de la más alta resistencia.

dición que para el formado mediante otros métodos de manufactura, como las técnicas de forjado y metalurgia de polvos.

12.3.2 Aleaciones para fundiciones ferrosas

Hierros fundidos. Los hierros fundidos representan la mayor cantidad de todos los metales fundidos, puesto que pueden fundirse con facilidad en formas intrincadas, y generalmente poseen propiedades deseables diversas, como resistencia al desgaste, alta dureza y buena maquinabilidad. El término *hierro fundido* se refiere a una familia de aleaciones y, como se describió en la sección 4.6, se clasifican en hierro fundido gris (hierro gris), hierro dúctil (nodular o esferoidal), hierro fundido blanco, hierro maleable y hierro de

grafito compactado. Sus propiedades generales y aplicaciones típicas se relacionan en las tablas 12.3 y 12.4.

1. **Hierro fundido gris.** Las fundiciones de hierro gris tienen relativamente pocas cavidades por contracción y baja porosidad. Algunas formas de fundición de hierro gris son la *ferrítica*, la *perlítica* y la *martensítica* y, debido a las diferencias presentes en sus estructuras, cada tipo tiene propiedades diferentes (tabla 12.4). Los hierros fundidos grises se especifican mediante una designación ASTM de dos dígitos; así, por ejemplo, la clase 20 especifica que el material debe tener una resistencia mínima a la tensión de 20 ksi (140 MPa). Los usos típicos del hierro fundido gris se dan en monoblocks de motor, carcasas de motores eléctricos, tuberías y superficies que implican desgaste en la maquinaria; también, debido a su alta capacidad de amortiguamiento, el hierro gris se utiliza ampliamente en bancadas para máquinas herramientas (sección 25.3).
2. **Hierro dúctil (nodular).** Comúnmente se utiliza para piezas de maquinaria, carcasas, engranes, tubos, rodillos para los molinos de laminación y cigüeñales para automóvil, los hierros dúctiles se especifican mediante un conjunto de números de dos dígitos. Por ejemplo, la clase o grado 80-55-06 indica que el material tiene resistencia mínima a la tensión de 80 ksi (550 MPa), resistencia mínima a la cedencia o fluencia de 55 ksi (380 MPa) y 6% de elongación en 2 pulg (50 mm).
3. **Hierro fundido blanco.** Debido a su alta dureza y alta resistencia al desgaste, el hierro fundido blanco se utiliza típicamente en rodillos para los molinos de laminación, zapatas de freno para vagones de ferrocarril y carcasas protectoras en maquinaria que procesa materiales abrasivos.
4. **Hierro maleable.** Las principales aplicaciones del hierro maleable son en equipos ferroviarios y diversos tipos de hardware, accesorios y componentes para aplicaciones eléctricas. Los hierros maleables se especifican mediante una designación de cinco dígitos; por ejemplo, 35018 indica que la resistencia a la cedencia o fluencia del material es de 35 ksi (240 MPa) y su elongación es de 18% en 2 pulgadas.
5. **Hierro de grafito compactado.** Producido comercialmente por primera vez en 1976, el hierro de grafito compactado (CGI, por sus siglas en inglés) tiene propiedades que se encuentran entre las de los hierros grises y los hierros dúctiles. El hierro gris tiene buena conductividad térmica y buen amortiguamiento pero baja ductilidad, mientras que el hierro dúctil tiene baja conductividad térmica y amortiguamiento, pero alta resistencia a la tensión y resistencia a la fatiga. El CGI tiene propiedades de amortiguamiento y térmicas similares a las del hierro gris y características de resistencia y rigidez comparables a las del hierro dúctil. Debido a su resistencia, las fundiciones de CGI pueden ser más pequeñas y, por lo tanto, más ligeras; este hierro es fácil de fundir y tiene propiedades constantes a lo largo de la fundición. Además, su maquinabilidad es mejor que la del hierro dúctil, una consideración importante puesto que el CGI se usa para monoblocks de motor de automóvil y cabezales de cilindro, los cuales requieren ser maquinados perfectamente en sus superficies.

Aceros fundidos. Debido a las altas temperaturas requeridas para fundir los aceros (hasta aproximadamente 1650 °C o 3000 °F), su fundición requiere consideraciones especiales. Las altas temperaturas involucradas presentan dificultades para la selección de los materiales de molde, en particular, dada la alta reactividad de los aceros con el oxígeno durante el vaciado y la fusión del metal. Las fundiciones de acero poseen propiedades más uniformes (isotrópicas) que las fabricadas mediante procesos de trabajado mecánico (parte III). Aunque los aceros fundidos pueden soldarse, la soldadura altera la microestructura de la fundición en la zona afectada por el calor (vea la figura 30.20), por lo que influye en la resistencia, ductilidad y tenacidad del metal base. Se requiere tratamiento térmico posterior para restablecer las propiedades mecánicas de la pieza fundida. Las soldaduras fundidas han cobrado importancia para el montaje de grandes máquinas y estructuras. Los aceros fundidos tienen importantes aplicaciones en minería, plantas químicas, campos petroleros, construcción pesada y equipos ferroviarios.

Aceros inoxidables fundidos. La fundición de aceros inoxidables implica consideraciones semejantes a las dedicadas a los aceros. Por lo general, los aceros inoxidables tienen

grandes rangos de solidificación y temperaturas de fusión elevadas. Pueden desarrollar varias estructuras, dependiendo de su composición y parámetros de procesamiento. Los aceros inoxidables fundidos están disponibles en varias composiciones y pueden tratarse térmicamente y soldarse; las piezas tienen alta resistencia al calor y a la corrosión, especialmente en las industrias química y alimentaria. Las aleaciones de fundición base níquel se utilizan en ambientes muy corrosivos y para servicio a muy altas temperaturas.

12.4 Consideraciones económicas en la fundición

Tal como sucede con todos los procesos de manufactura, el costo de cada pieza fundida (costo unitario) depende de varios factores, incluyendo materiales, equipos y mano de obra. De los diversos procesos de fundición descritos en el capítulo 11, algunos requieren más mano de obra que otros, algunos necesitan dados y maquinaria costosos y otros requieren tiempos de producción largos para fabricar las piezas de fundición (tabla 12.6). Así, cada uno de estos factores individuales afecta el costo global de una operación de fundición en diversos grados. Como puede verse en la tabla 12.6, la fabricación de moldes para la fundición en arena implica un costo relativamente bajo, mientras que los moldes para procesos de fundición distintos y los dados para la fundición en dado requieren materiales y operaciones de manufactura caros. También hay grandes costos involucrados en la producción de modelos para la fundición, aunque se están realizando grandes avances (como se indica en la sección 11.2.1) en la utilización de técnicas de prototipado rápido (capítulo 20) para reducir los costos y el tiempo.

También se incurre en costos por la fusión y el vaciado del metal fundido en moldes, así como por tratamiento térmico, limpieza e inspección de las piezas de fundición. El tratamiento térmico es una parte importante de la producción de muchos grupos de aleaciones (especialmente en las fundiciones ferrosas) y puede ser necesario para mejorar propiedades mecánicas. Sin embargo, el tratamiento térmico también puede introducir otro conjunto de problemas de producción (como formación de incrustaciones en las superficies de la fundición y alabeo de la pieza) que pueden constituirse en un aspecto significativo de los costos de producción.

La mano de obra y las habilidades requeridas para efectuar estas operaciones pueden variar considerablemente, dependiendo de la operación de fundición en particular y del nivel de automatización de la fundidora. Por ejemplo, la fundición por revestimiento requiere mucha mano de obra debido a los distintos pasos que involucra la operación. Es posible implementar cierta automatización, como el uso de robots (figura 11.13a), mientras que operaciones como un proceso de fundición en dado altamente automatizado puede mantener altas tasas de producción con poca mano de obra requerida.

TABLA 12.6

Características generales de costo de los procesos de fundición

Proceso de fundición	Costo*			Tasa de producción (piezas/h)
	Dado	Equipo	Mano de obra	
En arena	B	B	B-M	< 20
En molde de cáscara	B-M	M-A	B-M	< 10
En yeso	B-M	M	M-A	< 10
Por revestimiento	M-A	B-M	A	< 1000
En molde permanente	M	M	B-M	< 60
En dado	A	A	B-M	< 200
Centrífugo	M	A	B-M	< 50

*B = Bajo, M = Medio, A = Alto.

Observe que el costo del equipo disminuirá por fundición a medida que aumente el número de piezas fundidas; mantener altas tasas de producción puede justificar el alto costo de los dados y la maquinaria. Sin embargo, cuando la demanda es relativamente pequeña, el costo por fundición aumenta rápidamente y entonces resulta más económico fabricar las piezas mediante los otros procesos de fundición descritos en este capítulo, o utilizando otros procesos de manufactura que se describen con detalle en las partes III y IV de este libro.

RESUMEN

- Se han establecido lineamientos generales para ayudar en la producción de piezas fundidas que estén libres de defectos y cumplan con las tolerancias dimensionales, los acabados superficiales, los requisitos de servicio y toda una variedad de especificaciones y normas. Dichos lineamientos se refieren a la forma de la pieza fundida y a diversas técnicas utilizadas para minimizar los puntos calientes que podrían conducir a cavidades por contracción. Debido al gran número de variables que intervienen, el control estricto de todos los parámetros resulta esencial, particularmente los relacionados con la naturaleza del flujo del metal líquido en los moldes y dados y con la velocidad de enfriamiento en las diferentes regiones del molde.
- Existen muchas aleaciones de fundiciones no ferrosas y ferrosas con una amplia gama de propiedades, características de fundición y aplicaciones. Debido a que muchas fundiciones se diseñan y producen para ser ensambladas con otros componentes mecánicos y otras estructuras (subensambles), también son importantes otras consideraciones, como las características de soldabilidad y maquinabilidad y los aspectos superficiales.
- Dentro de los límites del buen desempeño, en la fundición las consideraciones económicas son tan importantes como las consideraciones técnicas. Los factores que influyen en el costo global son los costos de los materiales, moldes, dados, equipos y mano de obra; cada uno de los cuales varía según la operación de fundición en particular.

TÉRMINOS CLAVE

Ángulo de salida	Hierro fundido	Puntos calientes	Tolerancias en el maquinado
Cavidades por contracción	Línea de partición	Rebabas	
Costo unitario	Porosidad	Tolerancias de contracción del fabricante de modelos	
Hierro de grafito compactado	Principios de diseño		

BIBLIOGRAFÍA

- Analysis of Casting Defects, American Foundrymen's Society, 2002.
- ASM Handbook, Vol. 15: Casting, ASM International, 2008.
- ASM Specialty Handbook: Cast Irons, ASM International, 1996.
- Campbell, J., Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design, Butterworth-Heinemann, 2011.
- Casting Design and Performance, ASM International, 2008.
- Casting Design Handbook, ASM International, 2012.
- Laird, G., Gundlach, R. y Rohrig, K., Abrasion-Resistant Cast Iron Handbook, American Foundry Society, 2000.
- Powell, G. W., Cheng, S. -H. y Mobley C. E., Jr., A Fractography Atlas of Casting Alloys, Battelle Press, 1992.
- Product Design for Die Casting, Diecasting Development Council, 1988.
- Steel Castings Handbook, 6a. ed., ASM International, 1995.

PREGUNTAS DE REPASO

- 12.1** ¿Por qué los aceros son más difíciles de fundir que el hierro fundido?
12.2 ¿Cuál es la importancia de los puntos calientes en la fundición de metales?
12.3 ¿Qué es la tolerancia de contracción? ¿Y la tolerancia de maquinado?
12.4 Explique la razón de los ángulos de salida en los moldes.
12.5 ¿Por qué son útiles las costillas en las superficies planas?
12.6 ¿Qué son las fundiciones ligeras y dónde se utilizan con mayor frecuencia?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 12.12** Describa sus observaciones sobre las modificaciones de diseño mostradas en la figura 12.1.
12.13 Si usted necesita sólo unas cuantas fundiciones con el mismo diseño, ¿cuáles serían los tres procesos más costosos por pieza fundida?
12.14 En general, ¿está usted de acuerdo con las calificaciones de costo de la tabla 12.6? Si es así, ¿por qué?
12.15 Describa la naturaleza de las diferencias de diseño que se muestran en la figura 12.4. ¿Qué principios generales observa usted en esta figura?
12.16 En la figura 12.5, observe que la ductilidad de algunas aleaciones de fundición es muy baja. ¿Cree usted que esto debería ser una preocupación importante en las aplicaciones de ingeniería de las fundiciones? Explique su respuesta.
12.17 ¿Cree usted que habrá un menor número de defectos en una fundición realizada mediante vaciado por gravedad que en una hecha por vaciado bajo presión? Explique su respuesta.
12.18 Explique la diferencia en importancia de los ángulos de salida para fundiciones en arena verde y fundiciones en molde permanente.
12.19 ¿Qué tipo de fundición sería adecuada en la fabricación de bancadas de maquinaria pesada, como prensas y máquinas herramientas? ¿Por qué?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

- 12.26** En el diseño de modelos para fundición, los fabricantes de modelos usan reglas especiales que incorporan automáticamente las tolerancias de contracción sólida en sus diseños. Por ejemplo, una regla de 12 pulg de un fabricante de modelos es mayor que 1 pie. ¿Qué tan larga debería ser la regla de un fabricante de modelos para hacer (a) fundiciones de aluminio y (b) fundiciones de acero al manganeso?
12.27 Con la información dada en la tabla 12.2, desarrolle gráficas aproximadas de (a) capacidad para fundirse contra soldabilidad y (b) capacidad para fundirse contra maquinabilidad para al menos cinco de los materiales listados en la tabla.
12.28 La pieza de la figura P12.28 debe fundirse usando bronce con 10% de Sn a razón de 100 piezas al mes. Para encontrar un proceso de fundición adecuado, considere todos los procesos de fundición, después rechace aquellos que sean (a) técnicamente inadmisibles, (b) técnicamente posibles, pero demasiado caros para el propósito, y (c) determine el más económico. Redacte sus consideraciones sobre una base lógica utilizando supuestos de sentido común acerca de los costos.

- 12.7** Mencione los tipos de hierros fundidos generalmente disponibles y liste sus principales características y aplicaciones.
12.8 Comente sus observaciones en relación con la figura 12.5.
12.9 Describa la diferencia entre un canal de alimentación y una compuerta.
12.10 ¿Cuál es la diferencia entre la tolerancia de maquinado y la tolerancia dimensional?
12.11 ¿Qué es la escoria? ¿Se puede eliminar?

- 12.20** Explique las ventajas y limitaciones de los bisels agudos y redondeados, respectivamente, en el diseño de fundiciones.
12.21 Explique por qué el módulo de elasticidad, E , del hierro fundido gris varía tan ampliamente como se muestra en la tabla 12.4.
12.22 Si usted fuera a incorporar letras o números en una pieza fundida en arena, ¿los haría sobresalir de la superficie o estarían hundidos en la superficie? ¿Qué haría si fabricara la pieza mediante fundición por revestimiento? Explique sus respuestas.
12.23 En la fundición en arena, las recomendaciones generales de diseño para un amortiguador (pozo) (vea la figura 11.3) son que (a) su diámetro debe ser al menos dos veces el diámetro de salida del bebedero y (b) su profundidad debe ser aproximadamente dos veces la profundidad del distribuidor. Explique las consecuencias de alejarse de estos lineamientos.
12.24 Por lo general, en la fundición en arena, las regiones pesadas de las piezas se colocan en el molde inferior y no en el superior. Explique por qué.
12.25 ¿Cuáles son las ventajas y los inconvenientes de tener una temperatura de vaciado mucho más alta que la temperatura de fusión del metal? ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de que la temperatura de vaciado permanezca cerca de la temperatura de fusión?

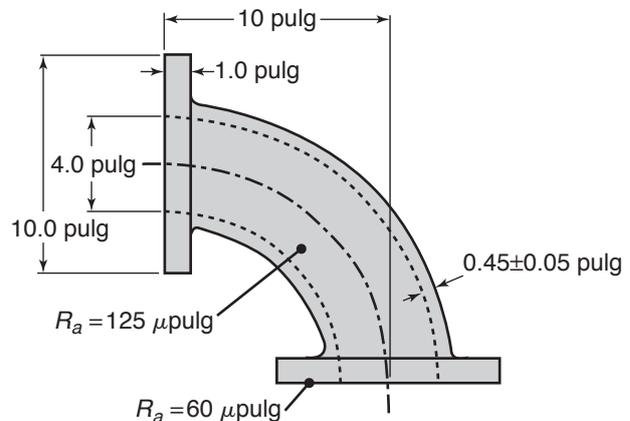


FIGURA P12.28

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

12.29 Describa las consideraciones generales de diseño relacionadas con la fundición de metales.

12.30 Añada más ejemplos de aplicaciones a los que se muestran en la figura 12.2.

12.31 Explique cómo son útiles las costillas y los dientes de sierra en la fundición de superficies planas, que de lo contrario podrían deformarse. Proporcione una ilustración específica.

12.32 Liste procesos de fundición que sean adecuados para la fabricación de piezas huecas con (a) características externas complejas, (b) características internas complejas y (c) características complejas tanto internas como externas. Explique sus opciones.

12.33 Con frecuencia, en la fundición, después de eliminar la nata del baño metálico persisten pequeñas cantidades de escoria y desechos que se introducen en el flujo de metal fundido. Reconociendo que la escoria y los desechos (inclusiones) son menos densos que el metal, diseñe características de un molde de fundición que eliminen estas pequeñas cantidades de escoria antes de que el metal alcance la cavidad del molde.

12.34 Si usted necesita sólo unas cuantas piezas de una fundición particular, ¿qué proceso(s) usaría? ¿Por qué?

12.35 Para la rueda de metal fundido que se ilustra en la figura P12.35, muestre cómo pueden utilizarse (a) la ubicación de la mazarota, (b) la ubicación del corazón, (c) el relleno y (d) los enfriadores para ayudar a alimentar el metal fundido y eliminar la porosidad en la saliente central que se encuentra aislada.

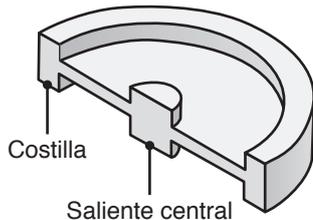


FIGURA P12.35

12.36 Suponga que se pierde la introducción a este capítulo. Escriba una breve introducción para destacar la importancia de los temas tratados en el mismo.

12.37 En la figura P12.37, el diseño original de fundición que se muestra en (a) se cambia de tamaño y se modifica para incorporar costillas en el diseño mostrado en (b). La pieza fundida es redonda y tiene un eje de simetría vertical. ¿Qué ventajas cree usted que tiene el nuevo diseño como pieza funcional sobre el diseño anterior?

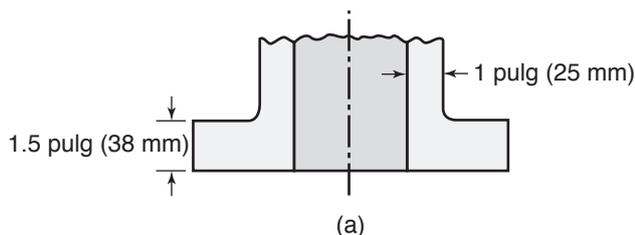


FIGURA P12.37

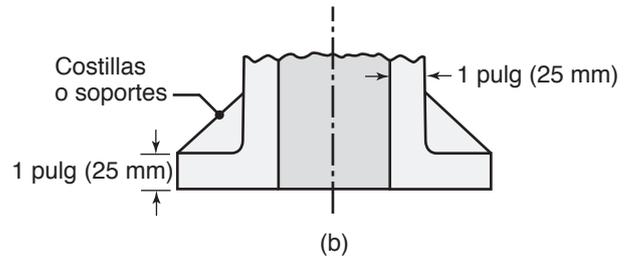


FIGURA P12.37 (continuación)

12.38 En la figura P12.38 se muestran un diseño incorrecto y otro correcto de una fundición. Revise los cambios realizados y comente sobre sus ventajas.

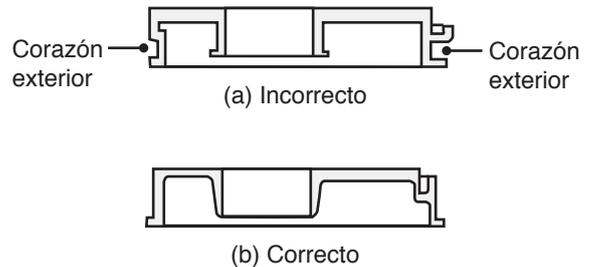


FIGURA P12.38

12.39 Usando el método de los círculos inscritos que se muestra en la figura 12.2, justifique la tendencia mostrada en la figura 12.3.

12.40 Una tendencia creciente es la producción de modelos y moldes a través de enfoques de prototipado rápido, los cuales se describen en el capítulo 20. Considere el caso de una operación de moldeo por inyección, donde se producen modelos mediante prototipado rápido y después se ensamblan manualmente en árboles y se procesan de manera tradicional. ¿Qué reglas de diseño analizadas en este capítulo seguirían siendo válidas y cuáles no serían tan importantes en este caso?

12.41 Repita el problema 12.40 para el caso en que (a) se produce un modelo de fundición en arena mediante prototipado rápido, y (b) se produce un molde de arena para fundición en arena.

Procesos y equipos para formado y para dar forma

Cuando revisamos los numerosos productos que nos rodean, pronto nos damos cuenta de que, en su elaboración, se ha utilizado una gran variedad de materiales y procesos, tal como puede verse en el ejemplo de un automóvil que se muestra en la figura III.1. También se observará que algunos productos constan de unas pocas piezas, como las gafas, los lápices y artefactos de iluminación, mientras que otros se componen de cientos o miles de piezas, digamos los relojes, automóviles y computadoras o, incluso, millones de piezas, como aviones y barcos.

Algunos productos tienen formas simples, con curvaturas suaves, mientras que otros tienen configuraciones complejas y características superficiales detalladas. Algunos se utilizan en aplicaciones críticas, como los cables para ascensor y los álabes de turbina, mientras que otros se usan para aplicaciones rutinarias, como los clips para papel, tenedores y cerraduras de puertas. Hay productos muy delgados, el papel aluminio y películas de plástico, mientras otros son muy gruesos, como los cascos de barcos, placas de las calderas y las grandes bancadas para máquina.

Observemos que, en el título de esta parte del libro, se utiliza tanto la palabra **formado** (*forming*) como la expresión **para dar forma** (o **conformado**, *shaping*). Aunque no siempre existe una distinción clara entre una y otra, el *formado* generalmente se refiere al cambio de la forma de un cuerpo sólido existente. Por lo tanto, en los **procesos de formado**, el material de inicio (usualmente llamado pieza de trabajo o material) puede tener la forma de una placa, hoja (lámina), barra, varilla, un alambre o un tubo. Por ejemplo, un gancho ordinario de alambre para colgar ropa se hace mediante el formado de un trozo de alambre recto, por flexión y torsión en la forma de una percha. De igual modo, la ca-

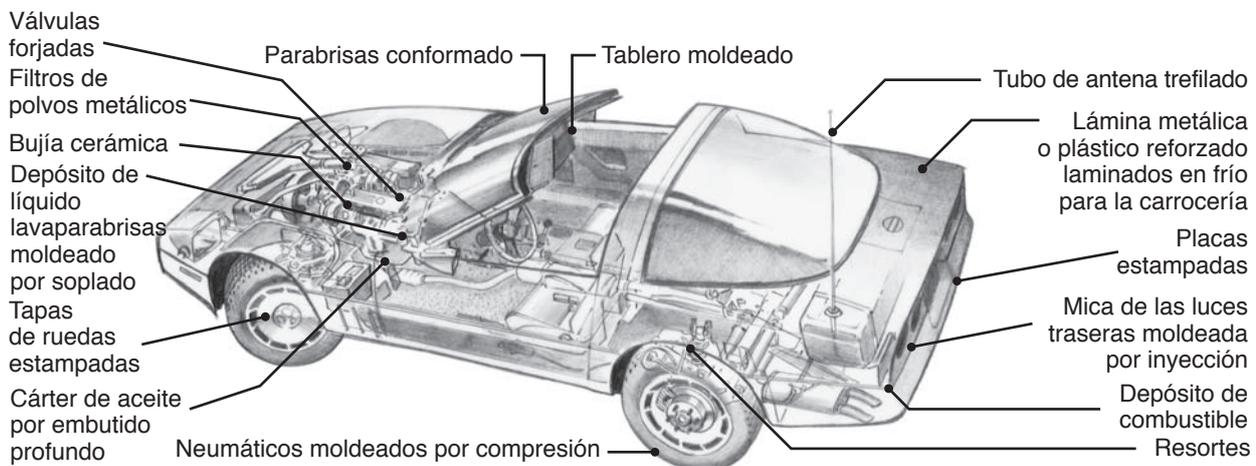


FIGURA III.1 Piezas formadas y conformadas de un automóvil típico.

rocería de hoja metálica para un automóvil está generalmente hecha de chapa de acero plana, laminada en frío, que después se forma de diversas maneras, dando lugar al cofre, al toldo, a la cajuela y los paneles de las puertas, utilizando un par de matrices grandes.

De manera típica, los **procesos para dar forma** comprenden moldeo y fundición, con lo cual se produce una pieza que generalmente tiene la forma final deseada o una muy cercana. Un gancho de ropa de plástico, por ejemplo, se hace introduciendo plástico fundido en un molde de dos piezas que tiene una cavidad con la forma del gancho deseado. Las carcasas de teléfonos y computadoras, los revestimientos de las puertas de refrigerador, algunas piezas de carrocería y un sinnúmero de otros productos de plástico son *conformados* de igual modo: introduciendo polímero fundido en un molde para retirarlo luego de la solidificación.

Algunas operaciones de formado y para dar forma producen artículos largos y *continuos*, tales como placas, láminas, tubos, alambres, varillas y barras con diversas secciones transversales que luego se conforman en productos específicos. Los procesos de laminación, extrusión y trefilado (capítulos 13 y 15) son capaces de entregar este tipo de productos largos que luego se cortan a las longitudes deseadas. Por otro lado, procesos como el forjado (capítulo 14), formado y estampado de lámina metálica (capítulo 16), la metalurgia de polvos (capítulo 17), el vaciado de cerámicos y el prensado de vidrio (capítulo 18), así como los procesos que involucran plásticos y plásticos reforzados (capítulo 19), suelen producir productos *discretos*.

Por lo general, la materia prima utilizada en el formado y conformado de metales es metal fundido, el cual se *funde* en *lingotes* individuales o de manera *continua* en placas, varillas o tubos. Las estructuras fundidas se convierten en *estructuras forjadas* mediante procesos de deformación plástica. La materia prima utilizada también puede consistir en *polvos metálicos* que luego se prensan y sinterizan (se calientan sin fundirlos) en piezas

TABLA III.1

Características generales de los procesos de formado y para dar forma	
Proceso	Características
Laminación	
Plano	Producción de placas planas, láminas y papel a altas velocidades; buen acabado superficial, especialmente en la laminación en frío; inversión de capital muy alta; costos de mano de obra de bajos a moderados.
De forma	Producción de diversos perfiles estructurales (como vigas I y rieles) a altas velocidades; incluye la laminación de roscas; requiere rodillos de formado y equipos costosos; costos de mano de obra de bajos a moderados; requiere habilidades moderadas del operador.
Forjado	Producción de piezas discretas con un juego de dados; por lo general, requiere algunas operaciones de acabado; usualmente se realiza a temperaturas elevadas, pero también en frío para las piezas más pequeñas; los costos de los dados y el equipo son altos; costos de mano de obra de moderados a altos; requiere habilidades del operador de moderadas a altas.
Extrusión	Producción de formas sólidas o huecas con grandes longitudes y secciones transversales constantes; los productos se cortan a las longitudes deseadas; generalmente se realiza a temperaturas elevadas; la extrusión en frío tiene similitudes con el forjado y se utiliza para fabricar productos diferenciados; costos de los dados y el equipo de moderados a altos; costos de mano de obra de bajos a moderados; requiere habilidades del operador de bajas a moderadas.
Trefilado	Producción de barras y alambres largos con distintas secciones transversales; buen acabado superficial; costos de dados, equipo y mano de obra de bajos a moderados; requiere habilidades del operador de bajas a moderadas.
Formado de lámina metálica	Producción de una amplia variedad de formas con paredes delgadas y geometrías simples o complejas; por lo general, con costos de matrices, equipo y mano de obra de bajos a moderados; requiere habilidades del operador de bajas a moderadas.
Metalurgia de polvos	Producción de formas simples o complejas mediante compresión y sinterizado de polvos metálicos; costos moderados de los dados y el equipo; bajo costo de mano de obra y bajas habilidades requeridas.
Procesamiento de plásticos y materiales compósitos	Fabricación de una amplia variedad de productos continuos o discretos mediante procesos de extrusión, moldeo, fundición y fabricación; costos de los dados y el equipo moderados; requiere alta habilidad del operador en el procesamiento de materiales compósitos.
Formado y conformado de cerámicos	Fabricación de productos discretos mediante distintos procesos para dar forma, de secado y cocción; costos de los moldes y el equipo de bajos a moderados; requiere habilidades del operador de moderadas a altas.

individuales. Para los plásticos, el material de inicio suele ser *pellets*, hojuelas o polvo; para los cerámicos, se utilizan arcillas y óxidos obtenidos a partir de minerales o producidos en forma sintética.

En esta parte del texto, se describen los factores importantes que intervienen en cada proceso de formado y para dar forma, junto con la manera en que las propiedades de los materiales y procesos afectan la calidad e integridad del producto elaborado (tabla III.1). Existen modelos matemáticos detallados de los procesos, como puede verse en la bibliografía incluida al final de cada capítulo; en este libro sólo se proporcionarán modelos simples de los diversos procesos de formado y para dar forma que se estudian.

También se explica por qué algunos materiales sólo pueden procesarse mediante ciertos métodos de manufactura específicos, además por qué determinadas piezas con formas particulares solamente se pueden procesar por medio de ciertas técnicas y no mediante otras. Asimismo, se incluyen las características de la maquinaria y el equipo utilizados, las cuales pueden influir significativamente en la calidad del producto, la tasa de producción y la economía de una operación de manufactura en particular.

13

Procesos y equipos para la laminación de metales

- 13.1 Introducción 316
- 13.2 Proceso de laminación plana 318
- 13.3 Práctica de la laminación plana 323
- 13.4 Molinos de laminación 326
- 13.5 Diversidad de procesos y molinos de laminación 328

EJEMPLO:

- 13.1 Cálculo de la fuerza de laminación y del torque en la laminación plana 320

- En este capítulo se describe la laminación de metales, que es la operación más importante del formado (*forming*) de metales con base en el volumen de metales laminados.
- El capítulo comienza con una descripción del proceso de laminación plana y analiza la fuerza, el torque y la potencia necesarios en términos de los parámetros relevantes del material y del proceso; también incluye un repaso de los defectos y sus causas en los productos laminados.
- Después se describen los procesos de laminación de perfiles, donde las piezas de trabajo pasan por una serie de rodillos para dar forma [o de conformado (*shaping*)].
- También se describen procesos especiales de laminación, como la laminación cruzada, de anillo, de roscas, de tubos y de perforación de tubos.
- El capítulo termina con una descripción de las características de los molinos de laminación y de los arreglos de rodillos para la fabricación de productos específicos.

Productos típicos fabricados mediante diversos procesos de laminación: placas de barcos, puentes, estructuras, máquinas; chapas metálicas para carrocerías, fuselajes de aviones, electrodomésticos, envases; papel para embalaje; vigas I, rieles de ferrocarril, formas arquitectónicas, grandes anillos, tubos y tubería sin costura; pernos, tornillos y componentes roscados.

Procesos alternativos: colada continua, extrusión, trefilado, maquinado de componentes roscados.

13.1 Introducción

Laminación es el proceso de reducir el espesor o cambiar la sección transversal de una pieza de trabajo larga mediante fuerzas de compresión aplicadas a través de un conjunto de **rodillos** (figura 13.1), este proceso es similar a aplanar masa de harina con un rodillo de madera. La laminación, que representa alrededor del 90% de todos los metales producidos mediante procesos metalúrgicos, se desarrolló por primera vez a finales del siglo XVI. En la actualidad, las prácticas modernas para la fabricación de acero y la producción de diversos metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas suelen integrar la *colada continua* con los procesos de laminación; este método mejora considerablemente la productividad y reduce los costos de producción, como se describe en la sección 5.4. Los materiales no metálicos también pueden laminarse para reducir su espesor y mejorar sus propiedades.

La laminación se lleva a cabo primero a temperaturas elevadas (*laminación en caliente*). Durante esta fase, la frágil y porosa estructura de grano grueso del lingote o del metal de colada continua es transformada en una *estructura de forjado* que tiene un tamaño de grano más fino y propiedades mejoradas, como una mayor resistencia y dureza. Posteriormente,

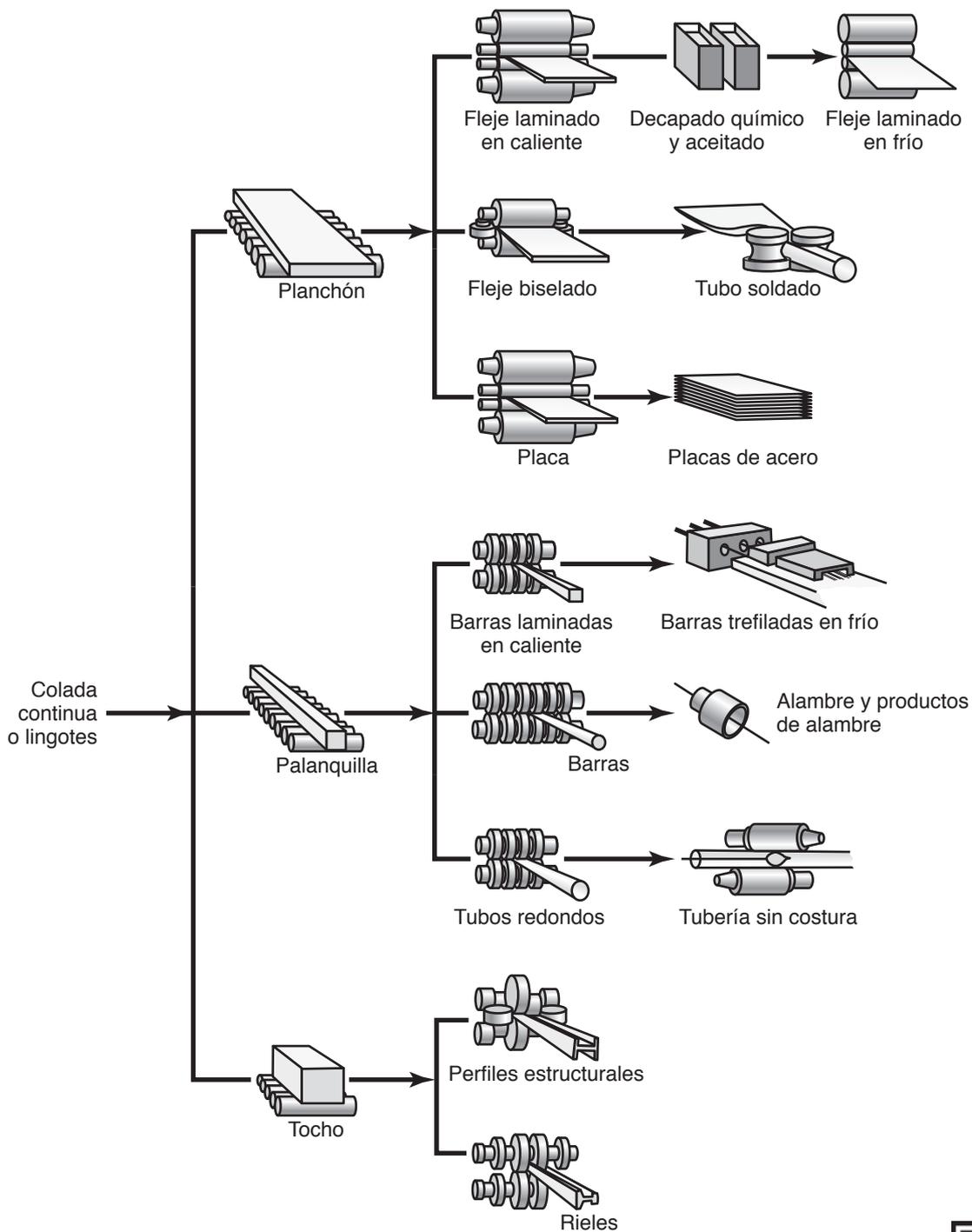


FIGURA 13.1 Esquema de los distintos procesos de laminación plana y laminación de forma. Fuente: Cortesía del American Iron and Steel Institute.



Código QR 13.1 Animación de la laminación en caliente de palanquillas. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

se puede realizar la laminación a temperatura ambiente (*laminación en frío*), gracias al cual la hoja laminada tiene mayor resistencia y dureza y mejor acabado superficial. Sin embargo, la laminación en frío resultará en un producto con propiedades anisotrópicas debido a la orientación preferida o al fibrado mecánico que se describen en la sección 1.6.

Las **placas** suelen tener un espesor de más de 6 mm (0.25 pulg) y se utilizan para aplicaciones estructurales, como cascos de barcos, calderas, puentes y maquinaria pesada.

Las placas pueden llegar a tener un espesor de hasta 300 mm (12 pulg) para los soportes estructurales grandes, 150 mm (6 pulg) para los recipientes de reactor y entre 100 y 125 mm (4 y 5 pulgadas) para los bastidores de máquinas y buques de guerra.

Por lo general, las **láminas** tienen menos de 6 mm de espesor y se entregan a las plantas de manufactura como bobinas, con peso de hasta 30 000 kg (33 tons), o como láminas planas para su posterior procesamiento en una amplia variedad de productos de chapa metálica. Las láminas se utilizan en carrocerías de camiones y fuselajes de aviones, en electrodomésticos, envases de alimentos y bebidas y en equipos para cocina y oficina. Es común que los fuselajes de los aviones comerciales y las carrocerías de remolques estén hechos de lámina de aluminio aleado con espesor mínimo de 1 mm (0.04 pulg). Por ejemplo, el espesor de la piel del fuselaje de un Boeing 747 es de 1.8 mm (0.07 pulg); la de un Lockheed L1011 es de 1.9 mm (0.075 pulg).

Las chapas de acero utilizadas en las carrocerías de automóvil y en las cubiertas de electrodomésticos tienen un espesor típico de alrededor de 0.7 mm (0.03 pulg). Las latas de aluminio para contener bebidas están hechas con láminas de 0.28 mm (0.01 pulg) de espesor; estos envases, después de su transformación en una lata (sección 16.7), se convierten en un cuerpo cilíndrico con un espesor de pared de 0.1 mm (0.004 pulg). De manera típica, el *papel aluminio* tiene un espesor de 0.008 mm (0.0003 pulg), aunque también se pueden producir láminas más delgadas de hasta 0.003 mm (0.0001 pulg).

13.2 Proceso de laminación plana

En la figura 13.2 se muestra una ilustración esquemática del proceso de *laminación plana*. Una tira de metal, de espesor h_o , entra en un **espacio de laminación** y su espesor se reduce a h_f por medio de un par de rodillos en rotación, cada rodillo es accionado individualmente por motores eléctricos. La velocidad superficial de los rodillos es V_r . La velocidad de la tira aumenta desde su valor de entrada V_o a medida que se desplaza a través del espacio entre los rodillos y es más alta a la salida de los rodillos, donde se denota como V_f . El metal se acelera en el espacio de laminación, de igual manera que un fluido incompresible fluye a través de un canal convergente.

Debido a que la velocidad superficial del rodillo rígido es constante, hay *deslizamiento relativo* entre el rodillo y la tira a lo largo de la longitud de contacto, L . En un punto, llamado **punto neutro** o **punto de no deslizamiento**, la velocidad de la tira es igual que la del rodillo. A la izquierda de este punto, el rodillo se desplaza más rápido que la tira; a la derecha de este punto, la tira se desplaza más rápido que el rodillo; en consecuencia, las fuerzas de fricción actúan sobre la tira como se muestra en la figura 13.2b.

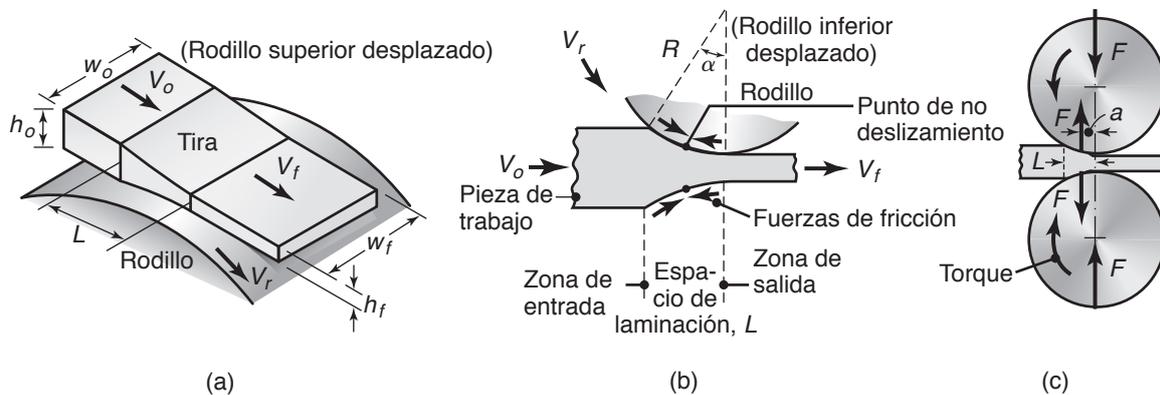


FIGURA 13.2 (a) Ilustración esquemática del proceso de laminación plana. (b) Fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies de la tira. (c) Fuerza de laminación, F , y torque, T , actuando sobre los rodillos. El ancho de la tira, w , por lo general se incrementa durante la laminación, como se muestra en la figura 13.5.

En la laminación, el *deslizamiento hacia adelante* se define en términos de la velocidad de salida de la tira, V_f , y de la velocidad superficial del rodillo, V_r , como

$$\text{Deslizamiento hacia adelante} = \frac{V_f - V_r}{V_r}, \quad (13.1)$$

y es una medida de las velocidades relativas involucradas en el espacio de laminación. El deslizamiento hacia adelante puede obtenerse fácilmente al medir las velocidades del rodillo y de la pieza de trabajo en un molino de laminación, esto proporciona una indicación en tiempo real de la ubicación del punto neutro. El deslizamiento hacia adelante se correlaciona también con el acabado superficial de la tira laminada, donde se prefieren valores bajos que valores altos.

Los rodillos jalan el material hacia el espacio de laminación mediante una *fuerza de fricción* ejercida sobre el material; así, debe existir una fuerza de fricción neta que se encuentra a la derecha en la figura 13.2b; esto significa también que la fuerza de fricción situada a la izquierda del punto neutro debe ser mayor que la fuerza de fricción de la derecha. Aunque la fricción resulta esencial para permitir la laminación (tal como lo es para el desplazamiento de un automóvil sobre una carretera), para superar la fricción se disipa energía; tenga en cuenta que el aumento de la fricción también incrementa las fuerzas de rodillo y los requisitos de potencia. Por otra parte, una fricción alta puede dañar la superficie del producto laminado o causar que éste se pegue. Por lo tanto, esto se resuelve en la práctica mediante la selección de un lubricante, lo cual conduce a niveles de fricción bajos y controlados.

El *pase máximo posible* se define como la diferencia entre los espesores inicial y final de la tira, o $(h_o - h_f)$; un pase grande podría causar que los rodillos se deslicen. Es posible demostrar que el pase máximo está en función del radio del rodillo, R , y el coeficiente de fricción, μ , de la siguiente manera:

$$h_o - h_f = \mu^2 R. \quad (13.2)$$

Por lo tanto, como se esperaba, cuanto mayor sea la fricción y más grande sea el radio del rodillo, mayor será el pase máximo posible. Ésta es una situación similar al uso de neumáticos de gran tamaño (R alto) y dibujo profundo (μ alta) en los tractores agrícolas y equipos para eliminar tierra de las carreteras, lo que permite a los vehículos desplazarse por terrenos irregulares sin derrapar.

13.2.1 Fuerza de laminación, torque y requisitos de potencia

Los rodillos aplican presión sobre la tira plana, resultante en una *fuerza de laminación*, F , como se muestra en la figura 13.2c. En la figura, observe que esta fuerza parece ser perpendicular al plano de la tira, en vez de formar un ángulo; esto es así porque, en la práctica, el arco de contacto es muy pequeño en comparación con el radio del rodillo, por lo tanto se puede suponer que la fuerza de laminación es perpendicular a la tira.

La fuerza de laminación en la laminación plana puede estimarse a partir de la expresión

$$F = LwY_{\text{prom}}, \quad (13.3)$$

donde L es la longitud de contacto entre el rodillo y la tira, w es el ancho de la tira y Y_{prom} es el esfuerzo real promedio (vea la sección 2.2.3) de la tira en el espacio de laminación. La ecuación (13.3) se aplica a una condición *sin fricción*; sin embargo, puede hacerse una estimación de la *fuerza de laminación real*, que incluya la fricción, al incrementar esta fuerza calculada en aproximadamente 20 por ciento.

El *torque* sobre el rodillo es el producto de F por a . Entonces, la potencia requerida por cada rodillo puede estimarse suponiendo que F actúa en el centro del arco de contacto; así, en la figura 13.2c, $a = L/2$. Por lo tanto, la *potencia total* (para dos rodillos), en unidades SI, es

$$\text{Potencia (kW)} = \frac{2\pi FLN}{60\,000}, \quad (13.4)$$

donde F está en newtons, L en metros y N es el número de revoluciones por minuto del rodillo. En unidades inglesas tradicionales, la potencia total se puede expresar como

$$\text{Potencia (hp)} = \frac{2\pi FLN}{33\,000}, \tag{13.5}$$

donde F está en libras y L en pies.

EJEMPLO 13.1 Cálculo de la fuerza de laminación y del torque en laminación plana

Dado: Una tira de cobre recocido con anchura de 9 pulg (228 mm) y espesor de 1.00 pulg (25 mm) se está laminando en una pasada hasta un espesor de 0.80 pulg (20 mm). El radio de rodillo es de 12 pulg (300 mm) y los rodillos giran a 100 rpm.

Se solicita: Calcular la fuerza de laminación y la potencia requerida en esta operación.

Respuesta: La fuerza de laminación se determina a partir de la ecuación (13.3), donde L es la longitud de contacto entre el rodillo y la tira. Es posible demostrar, usando geometría simple, que esta longitud está dada aproximadamente por,

$$L = \sqrt{R(h_o - h_f)} = \sqrt{12(1.00 - 0.80)} = 1.55 \text{ pulg}$$

El esfuerzo real promedio, Y_{prom} , para el cobre recocido se determina de la siguiente manera: primero observe que el valor absoluto de la deformación real que experimenta la tira en esta operación es

$$\epsilon = \ln\left(\frac{1.00}{0.80}\right) = 0.223.$$

Con referencia a la figura 2.5, el cobre recocido tiene un esfuerzo real de aproximadamente 12 000 psi en la condición sin deformar, de modo que en una deforma-

ción real de 0.223, el esfuerzo real es de 40 000 psi. Por consiguiente, el esfuerzo real promedio en el espacio de laminación es $(12\,000 + 40\,000)/2 = 26\,000$ psi. Así, la fuerza de laminación es

$$F = LwY_{\text{prom}} = (1.55)(9)(26\,000) = 363\,000 \text{ lb} = 1.6 \text{ MN}$$

La potencia total se calcula a partir de la ecuación (13.5), con $N = 100$ rpm. Así,

$$\begin{aligned} \text{Potencia} &= \frac{2\pi FLN}{33\,000} = \frac{2\pi(363\,000)(1.55/12)(100)}{33\,000} \\ &= 898 \text{ hp} = 670 \text{ kW} \end{aligned}$$

En la laminación, el cálculo exacto de los requisitos de fuerza y potencia puede ser difícil debido a las incertidumbres involucradas en (a) la determinación de la geometría de contacto exacta entre el rodillo y la tira y (b) la estimación precisa del coeficiente de fricción y la resistencia del material en el espacio de laminación. Para la laminación en caliente, debe tomarse en cuenta la sensibilidad de la resistencia del material a la velocidad de deformación, como se describió en la sección 2.2.7.

Reducción de la fuerza de laminación. La fuerza de laminación puede causar una deflexión significativa y aplanamiento de los rodillos, como lo hace en un neumático de caucho. A su vez, estos cambios afectan el proceso de laminación, su eficacia y capacidad para producir un espesor uniforme en la hoja laminada (conocida como *control de calibre*). Además, las columnas del **tren de laminación** (incluyendo la carcasa, las cuñas y los cojinetes, como se muestra en la figura 13.3c) sufrirían una deflexión tal, bajo las altas fuerzas de rodillo, que el espacio de laminación podría abrirse de manera significativa. Por consiguiente, los rodillos deben fijarse más cerca de lo calculado originalmente con el fin de compensar esta deflexión y obtener el espesor final deseado.

Las fuerzas de rodillo pueden reducirse por los siguientes medios (vea la figura 13.3 y las secciones 13.3 y 13.4):

- Usar rodillos con menor diámetro, para reducir el área de contacto.
- Realizar reducciones pequeñas cada pasada, para reducir el área de contacto.

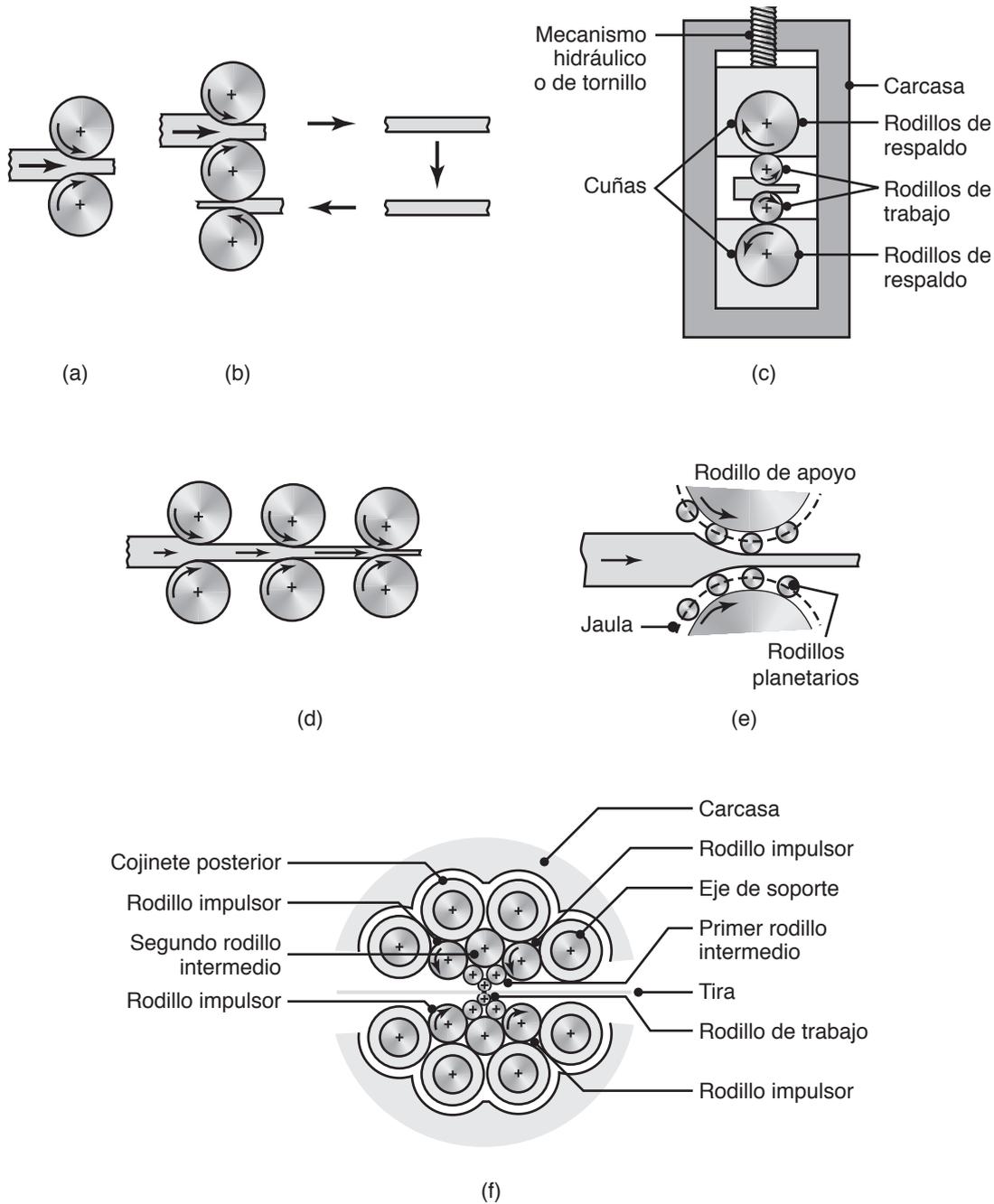


FIGURA 13.3 Ilustración esquemática de distintos arreglos de rodillos: (a) Molino de dos rodillos; si se usa un molino de dos rodillos para piezas gruesas pero cortas, comúnmente laminará una palanquilla de ida y vuelta en varias pasadas, lo que se conoce como un *molino reversible*. (b) Molino de tres rodillos con elevador para múltiples pasadas. (c) Molino de laminación de cuatro rodillos que muestra varias características; la rigidez de la carcasa, los rodillos y los cojinetes del rodillo son importantes para el control y mantenimiento del espesor de la tira laminada. (d) Laminación en tándem con tres estaciones. (e) Molino planetario y (f) Molino en racimo, también conocido como un *molino Sendzimir* o Z.

- Laminar a temperaturas elevadas, para reducir la resistencia del material.
- Aplicar tensiones posteriores y/o frontales a la tira, para reducir la presión de los rodillos.
- Reducir la fricción en la interfase del rodillo con la pieza.

Un método eficaz para reducir las fuerzas de rodillo es aplicar **tensión** longitudinal a la tira durante la laminación, como resultado los esfuerzos de compresión necesarios para deformar plásticamente el material se reducen (lo cual se conoce como disminución aparente del esfuerzo de cedencia del material; vea la bibliografía del capítulo 2). Debido a que requieren fuerzas de rodillo elevadas, las tensiones son importantes, particularmente en la laminación de metales con alta resistencia. Es posible aplicar tensiones a la tira, ya sea en la zona de entrada (**tensión posterior**), en la zona de salida (**tensión frontal**) o en ambas. La tensión posterior se aplica a la lámina mediante una acción de frenado al carrete que suministra la lámina al espacio de laminación (*carrete de suministro*). La tensión frontal se aplica mediante un aumento de la velocidad de rotación del *carrete de embobinado*. Aunque tiene aplicaciones limitadas y especializadas, la laminación también se puede llevar a cabo sólo con tensión frontal, sin suministrar potencia a los rodillos, lo cual se conoce como **laminación Steckel**.

13.2.2 Consideraciones geométricas

Debido a las fuerzas que actúan sobre los rodillos, éstos experimentan cambios de forma durante la laminación. Así como una viga recta sufre deflexión bajo una carga transversal, las fuerzas de rodillo tienden a doblar *elásticamente* los rodillos durante la laminación, como se muestra en la figura 13.4a; como resultado, la tira laminada será más gruesa en su centro que en sus bordes, esto se conoce como **corona**. Un método común para evitar este problema consiste en rectificar los rodillos de manera que en el centro su diámetro sea ligeramente mayor que en sus bordes (lo que se conoce como **combadura**). Así, cuando los rodillos se curvan, la tira que se está laminando tendrá un espesor constante a lo largo de su anchura (figura 13.4b).

Para la laminación de láminas metálicas, el radio máximo de la combadura es generalmente 0.25 mm (0.01 pulg) mayor que el radio de los extremos del rodillo; sin embargo, una curvatura en particular es correcta sólo para cierta carga y determinado ancho de la tira. Con el fin de reducir la deflexión, los rodillos también pueden someterse a flexión externa mediante la aplicación de momentos en sus cojinetes (como se puede demostrar simplemente al doblar una vara de madera en sus extremos para simular la combadura). Observe también que cuanto mayor sea el módulo de elasticidad del material del rodillo, más pequeña será la deflexión del rodillo (vea también la sección 13.4).

Debido al calor generado por el trabajo de la deformación plástica durante la laminación, los rodillos pueden llegar a tomar ligeramente la forma de barril, esto se conoce como **combadura térmica**. A menos que se compense por algunos medios, esta condición puede producir tiras que son más delgadas en el centro que en sus bordes. La combadura térmica se puede controlar ajustando la ubicación del suministro de los refrigerantes y su velocidad de flujo a lo largo de la longitud de los rodillos.

Las fuerzas de rodillo también tienden a *aplanar* los rodillos elásticamente, lo cual produce un efecto parecido al aplanamiento de los neumáticos de un automóvil. El aplanamiento es indeseable debido a que resulta, efectivamente, en un radio más grande del rodillo, lo que a su vez implica un área de contacto mayor para el mismo pase y, por lo tanto, aumenta la fuerza de laminación debido al área de contacto que es entonces más grande.

Ensanchado. En la laminación de placas y láminas con elevadas relaciones de ancho a espesor, el ancho de la tira permanece efectivamente constante durante la laminación. Sin embargo, con rela-

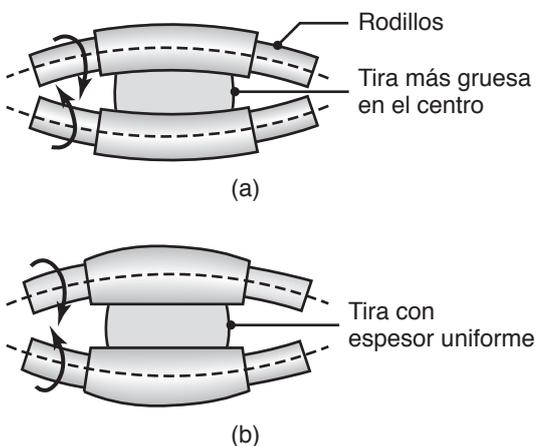


FIGURA 13.4 (a) Flexión de rodillos cilíndricos rectos causada por las fuerzas de rodillo. (b) Flexión de rodillos rectificadas con combadura, lo que produce una tira con espesor uniforme en toda su anchura. (Las deflexiones del rodillo se han exagerado para mayor claridad).

ciones más pequeñas (como en el caso de una barra con sección transversal cuadrada), su anchura aumenta significativamente a medida que pasa a través de los rodillos, un efecto que puede observarse fácilmente al aplanar masa con un rodillo. El aumento de la anchura se llama *ensanchado* (figura 13.5).

Es posible demostrar que el ensanchado aumenta con (a) la disminución de la relación de ancho a espesor de la tira entrante, debido a la reducción en la restricción del ancho, (b) el aumento de la fricción y (c) la disminución de la relación del radio del rodillo al espesor de la tira. El ensanchamiento puede evitarse también usando rodillos verticales, en contacto con los bordes de la tira; los rodillos verticales, o *molinos canteadores*, proporcionan una restricción física al ensanchado.

13.2.3 Vibración y traqueteo

La *vibración* y el *traqueteo* pueden tener efectos adversos significativos sobre la calidad del producto y la productividad en las operaciones de manufactura. Generalmente definido como *vibración autoexcitada*, el traqueteo en la laminación conduce a variaciones periódicas en el espesor de la hoja laminada y en el acabado superficial, además puede ocasionar desperdicio excesivo (vea la tabla 40.3). El traqueteo en la laminación se encuentra principalmente en los molinos en tándem (figura 13.3d). El traqueteo es muy perjudicial para la productividad; por ejemplo, se ha estimado que los molinos de laminación modernos podrían operar a velocidades hasta 50% más grandes de no ser por el traqueteo.

El traqueteo es un fenómeno complejo (vea también la sección 25.4), resulta de las interacciones entre la dinámica estructural de los bastidores del molino y la dinámica de la operación de laminación. Se encuentra que la velocidad de laminación y la lubricación son los dos parámetros más importantes. Aunque no siempre es práctica la implementación de lo siguiente, se ha sugerido que el traqueteo también puede reducirse mediante (a) un aumento de la distancia entre los bastidores del molino de laminación, (b) un aumento en el ancho de la tira, (c) una disminución en la reducción por pase, (d) un aumento del radio del rodillo, (e) un aumento de fricción entre la tira y el rodillo y (f) la incorporación de amortiguadores externos en los soportes del rodillo.

13.3 Práctica de la laminación plana

Los pasos iniciales de laminación (*rompimiento de estructura de colada*) del material se realizan a menudo por laminación en caliente, por encima de la temperatura de recristalización del metal (sección 1.7). Como se describe en la sección 10.2 y se ilustra en la figura 10.2, una *estructura de colada* es típicamente dendrítica, consiste en granos gruesos y no uniformes; esta estructura es generalmente frágil y también puede ser porosa. La laminación en caliente convierte la estructura de colada en una *estructura forjada* (figura 13.6) que tiene granos más finos y mayor ductilidad, ambas condiciones resultan de la ruptura de las fronteras de grano frágiles y el cierre de los defectos internos, incluyendo la porosidad. Los rangos típicos de temperatura en la laminación en caliente son alrededor de 450 °C (850 °F) para las aleaciones de aluminio, hasta 1250 °C (2300 °F) para los aceros aleados y hasta 1650 °C (3000 °F) para las aleaciones refractarias (vea también la tabla 14.3).

El producto laminado de la primera operación de laminación en caliente se llama **tocho**, **planchón** o **palanquilla** (vea la figura 13.1). Un tocho tiene, por lo general, una sección transversal cuadrada, por lo menos de 150 mm (6 pulg) por lado, mientras que un planchón suele tener una sección transversal rectangular. Los tochos se tratan luego mediante la *laminación de forma* para obtener perfiles estructurales, como vigas I y rieles de ferrocarril (sección 13.5). Los planchones se laminan en placas y láminas. Las palanquillas generalmente son cuadradas (con un área de sección transversal menor que la de los tochos) y se laminan posteriormente en diversas formas, como barras redondas y de perfiles, usando rodillos formadores. Las barras redondas laminadas en caliente, conocidas como **alambión**, se utilizan como material de inicio para las operaciones de trefilado de varilla y alambres (capítulo 15).

En la laminación en caliente de tochos, palanquillas y planchones, la superficie del material suele ser **acondicionada** (preparada para una operación posterior) antes de laminarla. Con frecuencia, el acondicionamiento se hace por medio de un soplete (*desbar-*

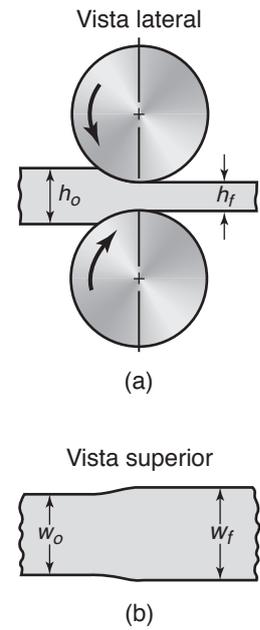


FIGURA 13.5 Ensanchado en la laminación plana; note que es posible observar un ensanchado semejante cuando se aplanar masa con un rodillo.

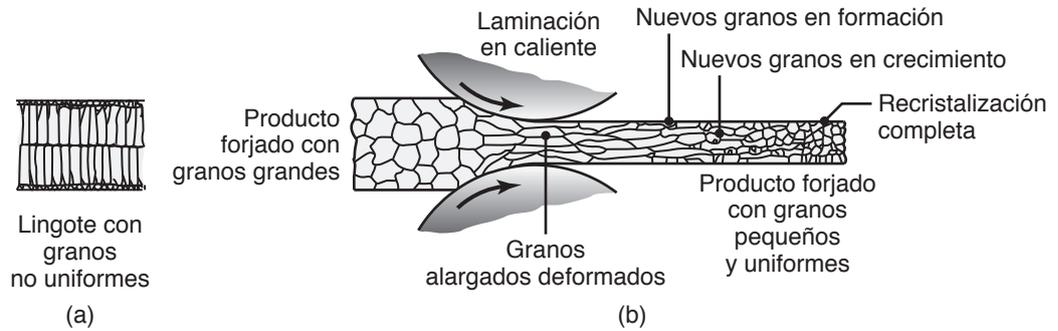


FIGURA 13.6 Cambios durante la laminación en caliente en la estructura granular de metales fundidos o forjados que contienen grano grueso. La laminación en caliente es una manera efectiva de reducir el tamaño de grano de los metales para mejorar su resistencia y ductilidad; las estructuras de colada continua o en lingotes (sección 5.4) se convierten en una estructura forjada mediante el trabajo en caliente.

bado) que elimina las cascarillas pesadas, o por un esmerilado grueso, con lo cual se desbastan las superficies. Antes de la laminación en frío, la *cascarilla* desarrollada durante la laminación en caliente puede eliminarse por decapado con ácidos (ataque con ácidos) y por medios mecánicos como chorros de agua o esmerilado.

La **laminación en frío** se lleva a cabo a temperatura ambiente y, en comparación con la laminación en caliente, produce láminas y tiras con un mucho mejor acabado superficial, mejores tolerancias dimensionales y propiedades mecánicas mejoradas (debido al endurecimiento por deformación).

La **laminación en conjunto** es una operación de laminación plana en la que se laminan juntas dos o más capas de lámina, lo que aumenta la productividad. Por ejemplo, el papel aluminio se lamina en un conjunto de dos capas, por lo que únicamente las superficies exteriores superior e inferior están en contacto con los rodillos. Recuerde que un lado del papel aluminio es mate, mientras que el otro lado es brillante. El lado en el que existe contacto de papel a papel tiene acabado mate y satinado, mientras que el lado donde existe contacto de papel a rodillo es brillante y lustroso (debido a que la superficie pulida del rodillo se imprime sobre el papel durante la laminación).

El acero dulce laminado, cuando se estira posteriormente durante las operaciones para el formado de láminas, sufre una *elongación del punto de fluencia* (sección 16.3), un fenómeno que causa irregularidades superficiales llamadas *deformaciones de estiramiento* o *bandas de Lüder*. Para evitar esta situación, la hoja metálica se somete a una pasada ligera final con una reducción de entre 0.5 y 1.5% (conocida como **temple por laminación** o **pasada superficial**) poco antes de estirla en una operación de formado subsiguiente.

Una hoja laminada puede no estar suficientemente plana cuando sale del espacio de laminación, debido a factores como variaciones en el material entrante o en los parámetros de procesamiento durante la laminación. Para mejorar la *planicidad*, la tira laminada pasa normalmente a través de una serie de **rodillos de nivelación**. Pueden usarse varias disposiciones de rodillos, como se muestra en la figura 13.7, donde se flexiona la lámina en direcciones opuestas a medida que pasa a través de los juegos de rodillos.

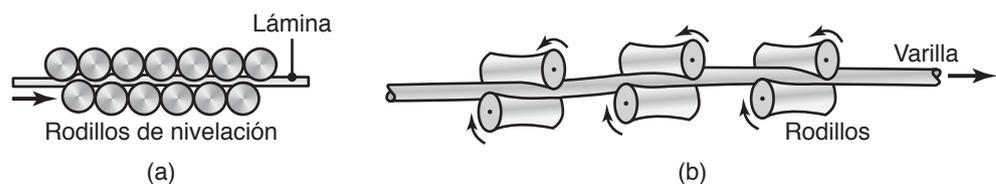


FIGURA 13.7 (a) Método de nivelación con rodillos para enderezar hojas laminadas. (b) Nivelación con rodillos para enderezar varillas trefiladas.

13.3.1 Defectos en placas y hojas laminadas

En las superficies de las placas y hojas laminadas (láminas), pueden presentarse defectos estructurales internos. Los defectos son indeseables porque afectan adversamente el aspecto de la superficie, y además porque pueden afectar la resistencia, la formabilidad y otras características de manufactura de las hojas laminadas. Se han identificado varios defectos superficiales (cascarilla, óxido, rayaduras, orificios, picaduras y grietas) en las láminas metálicas. Estos defectos pueden ser causados por inclusiones e impurezas en el material fundido original o por otras diversas condiciones relacionadas con la preparación del material y la operación de laminación.

Los **bordes ondulados** en las láminas (figura 13.8a) se deben al doblé del rodillo. La tira se hace más delgada a lo largo de sus bordes que en el centro (vea la figura 13.4a); por lo tanto, debido a la constancia del volumen en la deformación plástica, los bordes tienen que alargarse más que el material en el centro. En consecuencia, los bordes se pandean debido a que están limitados por la región central para expandirse libremente en la dirección longitudinal (de laminación).

Las **grietas** que se muestran en las figuras 13.8b y c suelen ser el resultado de una baja ductilidad del material a la temperatura de laminación. Debido a que la calidad de los bordes de las láminas es importante en las operaciones de formado posteriores, es posible que haya necesidad de eliminar tales defectos mediante operaciones de cizallamiento y cortado longitudinal (sección 16.2). Por lo general, el **lagartismo** (figura 13.8d) es causado por una deformación volumétrica no uniforme de la palanquilla durante la laminación o por la presencia de defectos en el material fundido original.

Dirección de laminación



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 13.8 Ilustración esquemática de los defectos típicos en la laminación plana: (a) bordes ondulados; (b) grietas con forma de cierre en el centro de la tira; (c) grietas en el borde y (d) lagartismo.

13.3.2 Otras características de los metales laminados

Esfuerzos residuales. Debido a la deformación no uniforme del material en el espacio de laminación, se pueden desarrollar esfuerzos residuales en las placas y hojas laminadas, especialmente en la laminación en frío. Los rodillos de diámetro pequeño o pequeñas reducciones de espesor por pasada tienden a deformar plásticamente el metal a un grado más alto en sus superficies que en su cuerpo (figura 13.9a). Esta situación ocasiona esfuerzos residuales de compresión en la superficie y esfuerzos de tensión en el cuerpo. Por el contrario, los rodillos de diámetro grande o grandes reducciones de espesor por pasada tienden a deformar más el cuerpo que las superficies (figura 13.9b). Esto se debe a la mayor restricción por fricción en las superficies a lo largo del arco de contacto, una situación

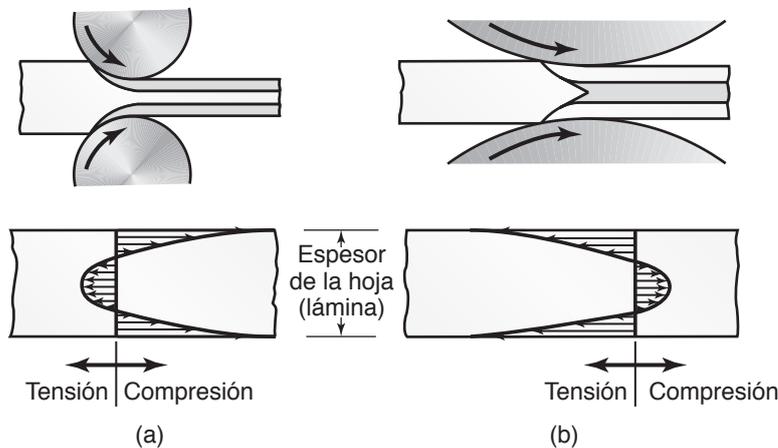


FIGURA 13.9 (a) Esfuerzos residuales desarrollados en la laminación con rodillos de diámetro pequeño o con pequeñas reducciones en el espesor por pasada. (b) Esfuerzos residuales desarrollados en la laminación con rodillos de diámetro grande o con grandes reducciones por pasada; observe que los patrones de esfuerzo residual son inversos.

que produce distribuciones de esfuerzos residuales contrarias a las que se presentan con los rodillos de diámetro pequeño.

Tolerancias dimensionales. Usualmente, las tolerancias de espesor para las hojas laminadas en frío van desde ± 0.01 hasta 0.05 mm (± 0.0004 a 0.002 pulg); las tolerancias son mucho mayores para las placas laminadas en caliente. Por lo general, las *tolerancias de planicidad* están dentro de ± 15 mm/m ($\pm 3/16$ pulg/pie) para la laminación en frío y ± 55 mm/m ($\pm 5/8$ pulg/pie) para la laminación en caliente.

Rugosidad superficial. Los rangos de rugosidad superficial para la laminación en frío y en caliente se dan en la figura 23.14, los cuales, con fines de comparación, también incluyen otros procesos de manufactura. Note que la laminación en frío puede producir un acabado superficial muy fino, por lo que los productos hechos a partir de hojas laminadas en frío pueden no requerir operaciones adicionales de acabado. También observe en la figura que la laminación en caliente y la fundición en arena producen el mismo rango de rugosidad superficial.

Números de calibre. El espesor de una hoja suele identificarse por medio de un *número de calibre*: cuanto menor sea el número, más gruesa será la hoja. En la industria se utilizan diversos sistemas de numeración en función del tipo de lámina metálica. Las láminas de cobre y latón laminadas se identifican generalmente por los cambios de espesor que tienen lugar durante la laminación; por ejemplo, 14 duro, 12 duro, etcétera.

13.4 Molinos de laminación

Distintos tipos de *molinos de laminación* y equipos están disponibles con una gama de tamaños y diversos arreglos de rodillos. Aunque los diseños de los equipos de laminación en caliente y en frío son esencialmente los mismos, existen diferencias importantes en los materiales de los rodillos, los parámetros del proceso, los lubricantes y los sistemas de enfriamiento. El diseño, la construcción y la operación de los molinos de laminación (figura 13.10) requieren grandes inversiones. Fábricas altamente automatizadas producen en la

actualidad placas y láminas de alta calidad con tolerancias estrictas, altas tasas de producción y bajo costo por unidad de peso, sobre todo cuando se integran con la colada continua (sección 5.4). El ancho de los productos laminados puede variar hasta 5 m (200 pulg) y las velocidades de laminación son de hasta 40 m/s (130 pies/s).

Los **molinos de laminación de dos rodillos** (figura 13.3a) se usan en la laminación en caliente para el rompimiento de la estructura de colada (*molinos de desbaste primario o consolidado por laminación*) en lingotes colados o productos de colada continua, con diámetros de rodillo de entre 0.6 y 1.4 m (24 y 55 pulg). En los **molinos de tres rodillos** (*molinos reversibles*, figura 13.3b), la dirección del movimiento del material a través de los rodillos se invierte después de cada pasada utilizando un mecanismo ascensor y varios manipuladores.

Los **molinos de cuatro rodillos** (figura 13.3c) y los **molinos de conjunto o racimo** (*molinos Sendzimir o Z*, figura 13.3f) utilizan cilindros de trabajo de diámetro pequeño para disminuir las fuerzas de rodillo (debido a una menor área de contacto del rodillo y la tira) y reducir así los



FIGURA 13.10 Vista de un molino de laminación. Fuente: Cortesía de Ispat Inland.

requisitos de potencia y el ensanchado. Por otra parte, cuando se gastan o rompen, los rodillos pequeños pueden reemplazarse a un costo más bajo que los grandes. Además, los rodillos pequeños sufren mayores deflexiones bajo las fuerzas de rodillo y, por lo tanto, tienen que estar soportados por otros rodillos de mayor diámetro. Aunque el costo de una instalación de molino Sendzimir es muy alto, resulta particularmente adecuada para la laminación en frío de láminas delgadas de metal y aleaciones de alta resistencia. Los anchos comunes de los productos laminados en este molino son de 0.66 m (26 pulg) con un máximo de 1.5 m (60 pulg).

En la **laminación en tándem**, la tira se lamina continuamente a través de una serie de **bastidores** (castillos) a calibres más finos con cada pasada (figura 13.11). Cada bastidor se compone de un conjunto de rodillos con su propia carcasa y sus propios controles; a un grupo de bastidores se le denomina *tren*. El control del espesor de la lámina y la velocidad a la que se desplaza a través de cada espacio de laminación son cruciales. En estas operaciones se utilizan extensos controles electrónicos y computacionales, en particular para la laminación de precisión a altas velocidades.

Materiales de rodillo. Los requisitos básicos para los materiales de rodillo son resistencia mecánica y resistencia al desgaste (vea también la tabla 5.8). Los materiales de rodillo comunes son el hierro colado, el acero fundido y el acero forjado; también se usa el carburo de tungsteno para rodillos de diámetro pequeño, como en el rodillo de trabajo del molino de conjunto (figura 13.3f). Los rodillos de acero forjado, aunque son más costosos que los de acero fundido, tienen mayor resistencia, rigidez y dureza que los rodillos de hierro colado. Los rodillos para la laminación en frío se rectifican hasta darles un acabado fino y, para aplicaciones especiales, también se pulen. Los rodillos hechos para la laminación en frío no deben utilizarse para laminar en caliente porque podrían agrietarse debido al ciclo térmico (*agrietamiento en caliente*) o al *descascarado* (agrietamientos o escamaciones de las capas superficiales).

Lubricantes. La laminación en caliente de aleaciones ferrosas suele llevarse a cabo sin lubricantes, aunque puede usarse grafito para reducir la fricción. Se pueden emplear soluciones a base de agua para enfriar los rodillos y romper la cascarilla del material laminado. Las aleaciones no ferrosas se laminan en caliente utilizando una variedad de

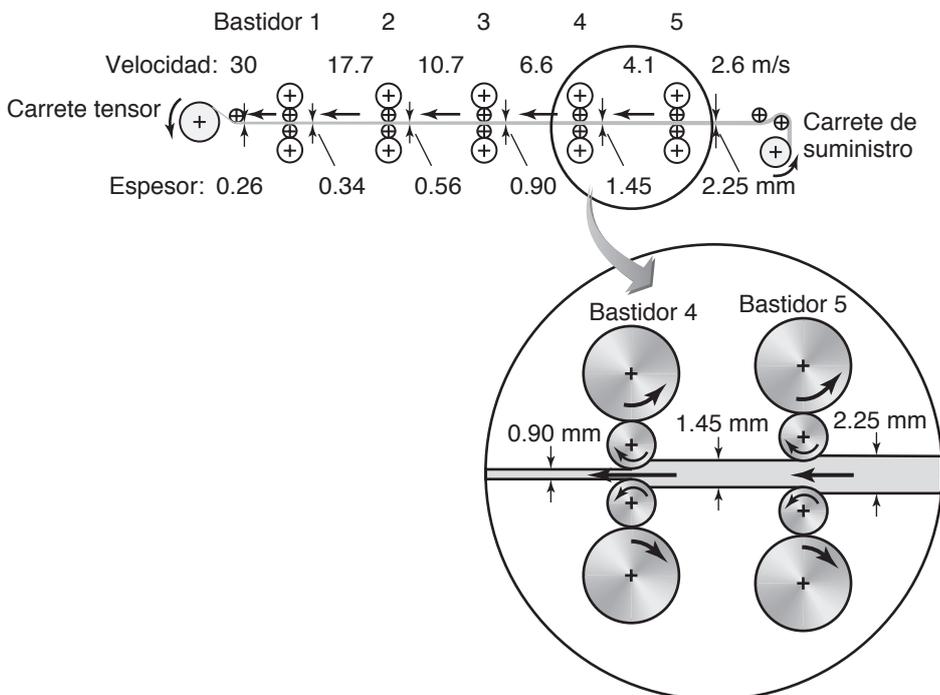


FIGURA 13.11 Ejemplo de una operación de laminación en tándem.

compuestos de aceites, emulsiones y ácidos grasos. La laminación en frío se lleva a cabo con aceites solubles en agua o lubricantes de baja viscosidad, como aceites minerales, emulsiones, parafina y aceites grasos (vea también la sección 33.7).

13.4.1 Molinos integrados y minimolinos

Molinos integrados. Estos molinos son grandes instalaciones que involucran la integración completa de las actividades, desde la producción de metal caliente en un alto horno hasta la fundición y la laminación de productos terminados, listos para ser enviados al cliente.

Minimolinos. La competencia en la industria del acero ha conducido al desarrollo de *minimolinos* en los que la chatarra se (a) funde en hornos de arco eléctrico, (b) se cuele de manera continua y (c) se lamina directamente en líneas específicas de productos. Cada minimolino produce esencialmente un tipo de producto laminado (varillas, barras o secciones estructurales, como ángulo de hierro), básicamente a partir de un tipo de metal o una aleación. La chatarra, obtenida localmente para reducir los costos de transporte, suele ser maquinaria, automóviles y equipos agrícolas viejos. Los minimolinos tienen la ventaja económica de reducir los costos de capital del equipo para cada tipo de metal y línea de productos, con bajos costos energéticos y de mano de obra. Los productos normalmente están dirigidos a mercados que se encuentran en la ubicación geográfica del molino en particular.



Código QR 13.2 Animación de la laminación de forma o de perfiles. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

13.5 Diversidad de procesos y molinos de laminación

Se ha desarrollado una diversidad de procesos y molinos de laminación para producir toda una variedad de formas de productos.

Laminación de forma o de perfiles. Las formas estructurales rectas y largas (como los canales, las vigas I, los rieles de ferrocarril y las barras sólidas) se fabrican por *laminación de forma (laminación de perfil)*, donde el material caliente pasa a través de pares de rodillos diseñados especialmente para el proceso (figura 13.12; vea también la figura 13.1). La *laminación de forma* también puede hacerse *en frío*, con materiales de inicio en la forma de varilla con diversas secciones transversales. Debido a que la sección transversal del material entrante se reduce de manera uniforme, el diseño adecuado de una secuencia de rodillos —llamado **diseño de las pasadas en rodillo**— es fundamental para evitar la formación de defectos internos y externos, mantener las tolerancias dimensionales y reducir el desgaste de los rodillos.

rodillos diseñados especialmente para el proceso (figura 13.12; vea también la figura 13.1). La *laminación de forma* también puede hacerse *en frío*, con materiales de inicio en la forma de varilla con diversas secciones transversales. Debido a que la sección transversal del material entrante se reduce de manera uniforme, el diseño adecuado de una secuencia de rodillos —llamado **diseño de las pasadas en rodillo**— es fundamental para evitar la formación de defectos internos y externos, mantener las tolerancias dimensionales y reducir el desgaste de los rodillos.

Forjado con rodillos. En esta operación, también llamada *laminación cruzada*, la sección transversal de una barra redonda se forma al pasar a través de un par de rodillos con ranuras perfiladas especialmente (figura 13.13). Por lo común, este proceso se utiliza para producir ejes cónicos y muelles, cuchillos de mesa y herramientas manuales. El forjado con rodillos también puede utilizarse como una operación de formado preliminar que estará seguido por otros procesos de forjado (capítulo 14).

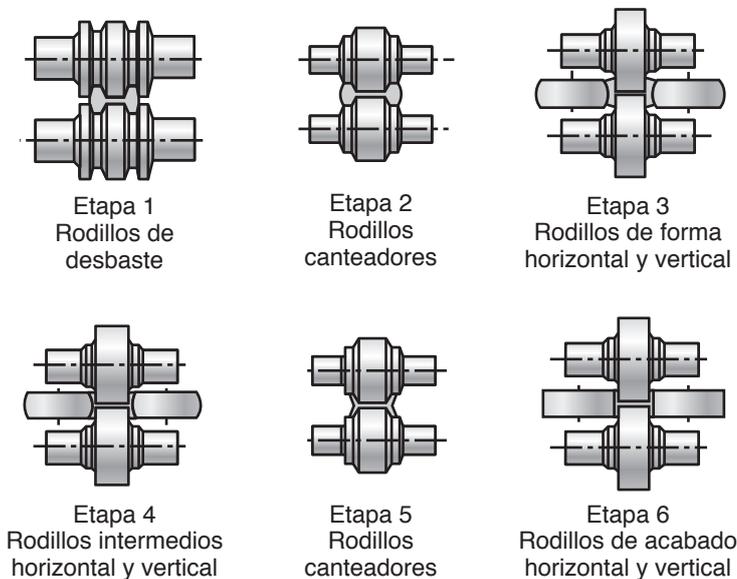


FIGURA 13.12 Pasos en la laminación de forma de una viga I. Existen diversas secciones estructurales, como canales y rieles, que también se laminan mediante este proceso.

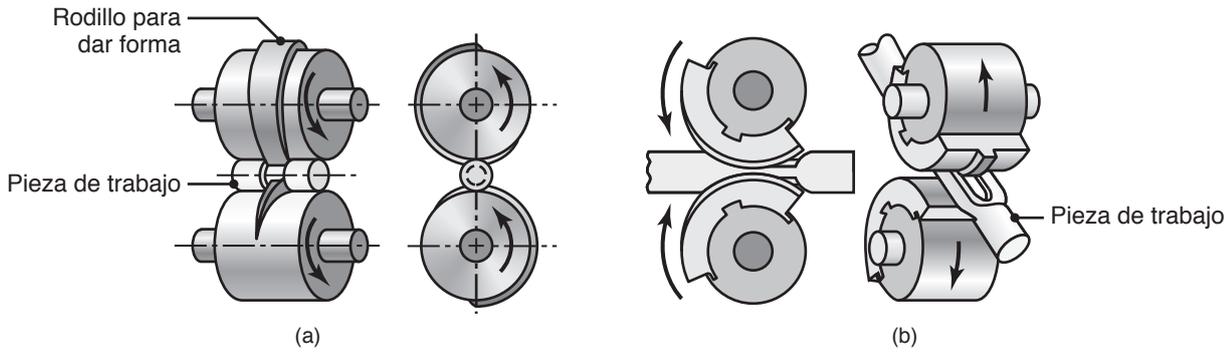


FIGURA 13.13 Dos ejemplos de la operación de forjado con rodillos, también conocida como laminación cruzada; mediante este proceso es posible fabricar muelles cónicos y cuchillos.
Fuente: Según J. Holub.

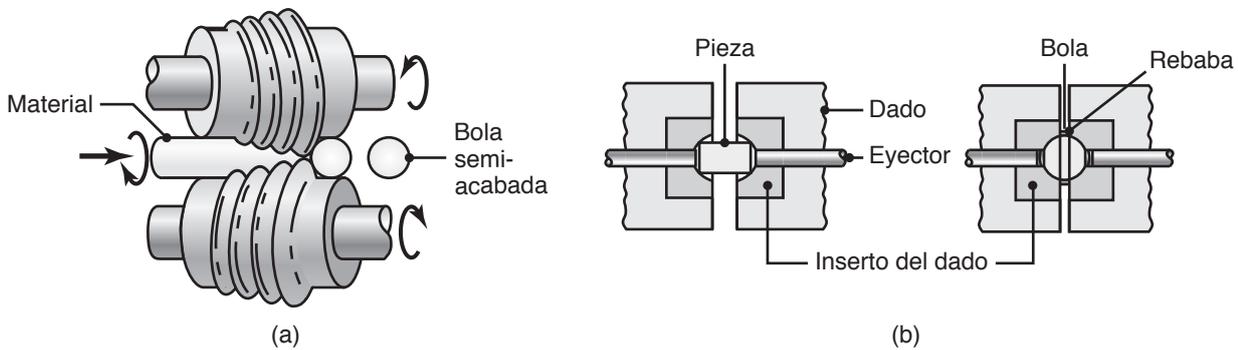


FIGURA 13.14 (a) Producción de bolas de acero mediante el proceso de laminación oblicua. (b) Producción de bolas de acero utilizando una pieza cilíndrica: note la formación de rebaba. Las bolas hechas mediante estos procesos se esmerilan y pulen posteriormente para utilizarlas en cojinetes de bolas.

Laminación oblicua. Un proceso similar al forjado con rodillos es la *laminación oblicua*, la cual suele utilizarse en la fabricación de cojinetes de bolas (figura 13.14a). Se introduce alambre o varilla redonda en el espacio de laminación y se forman piezas esféricas de manera continua debido a la acción de rodillos giratorios. (En la figura 13.14b se ilustra otro método para la formación de cojinetes de bolas, el cual es básicamente una operación de forjado tal como se describió en la figura 14.12). Las bolas, que requieren un acabado posterior, se rectifican y pulen en maquinaria especial (vea la figura 26.15).

Laminación de anillo. En la *laminación de anillo*, se coloca una pieza bruta con forma anular entre dos rodillos, uno de los cuales es impulsado mientras que el otro es un rodillo loco (figura 13.15a). El espesor del anillo se reduce al acercarse los rodillos entre sí a medida que giran. Puesto que el volumen del anillo permanece constante durante la deformación (constancia de volumen), la reducción del espesor del anillo resulta en un aumento de su diámetro. El proceso puede llevarse a cabo a temperatura ambiente o a una temperatura elevada, dependiendo del tamaño (que puede ser de hasta 10 pies, o 3 m, de diámetro) y de la fuerza y ductilidad del material.

En función de su tamaño, la pieza bruta puede producirse por medios como el corte de una placa, una perforación o el aserrado o corte de un tubo con paredes gruesas. Existen diversas formas que pueden laminarse en anillo usando rodillos para dar forma (figuras 13.15b a d). El espesor de los anillos también puede reducirse mediante un proceso de forjado en dado abierto, como se ilustra en la figura 14.4c; sin embargo, el control dimensional y el acabado superficial no serán tan buenos como los obtenidos con la laminación de anillo.

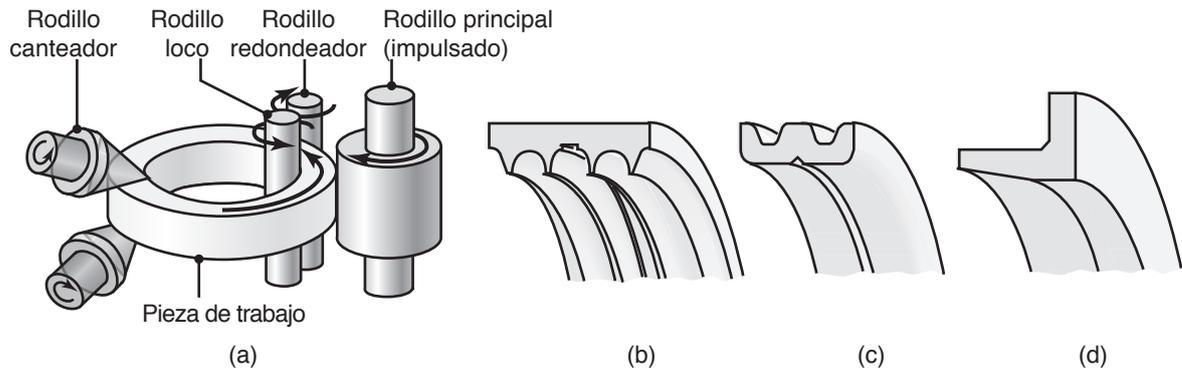


FIGURA 13.15 (a) Ilustración esquemática de una operación de laminación de anillo: la reducción del espesor resulta en un aumento del diámetro de la pieza. (b) a (d) Ejemplos de secciones transversales que pueden formarse mediante la laminación de anillo.



Código QR 13.3 Operaciones de laminación de anillo. (Fuente: Cortesía de la Forging Industry Association, www.forging.org).

Las aplicaciones típicas de la laminación de anillo tienen lugar en cubiertas para el cuerpo de cohetes y motores a reacción, trenes de cojinetes de bolas y rodillos, bridas y anillos de refuerzo para tuberías. En comparación con otros procesos de manufactura que son capaces de producir la misma pieza, las ventajas de la laminación de anillo son cortos tiempos de producción, bajo desperdicio, tolerancias dimensionales estrechas y flujo de grano favorable en el producto, mejorando así su resistencia en la dirección deseada.

Laminación de roscas. La *laminación de roscas* (también conocido como peinado de roscas) es un proceso de formado en frío mediante el cual se forman roscas rectas o cónicas sobre varilla redonda o alambrión. Las roscas se forman sobre la varilla o el alambrión con cada carrera de un par de dados planos (peines) recíprocos (figura 13.16a). En otro método, las roscas se forman utilizando dos rodillos (figura 13.16b) o *dados giratorios* o *planetarios* (figura 13.16c), a tasas de producción que pueden ser tan altas como 80 piezas por segundo. Las piezas típicas que se fabrican son tornillos, pernos y piezas roscadas similares. Dependiendo del diseño de los dados, el diámetro mayor de una rosca laminada puede ser más grande o más pequeño que el de una rosca maquinada (figura 13.17a), es decir, el mismo que el diámetro de la pieza bruta.

El proceso de laminación de roscas tiene las ventajas de generar roscas a altas tasas de producción y sin ningún desperdicio. El acabado de la superficie producida es muy terso y el proceso induce tensiones residuales de compresión en las superficies, mejorando así la resistencia a la fatiga. La laminación de roscas es superior a otros métodos de fabricación de roscas (particularmente al corte de roscas como el ilustrado en la figura 23.1k) porque el maquinado de roscas corta transversalmente las líneas de flujo del grano del material, mientras que la laminación de roscas resulta en un patrón de flujo del grano que mejora la resistencia de la rosca (figuras 13.17b y c). La **laminación de roscas internas** puede llevarse a cabo con un **machuelo formador** (sección 23.7). Ésta es una operación similar a la laminación de roscas externas, la cual produce roscas internas precisas y con buena resistencia.

Los engranes rectos y helicoidales pueden producirse mediante un proceso de laminación en frío similar a la laminación de roscas (vea también la sección 24.7); la operación puede realizarse sobre piezas brutas cilíndricas sólidas o en engranes cortados previamente. La laminación en frío de engranes tiene amplias aplicaciones en transmisiones automáticas y herramientas eléctricas.

La lubricación es importante en las operaciones de laminación de roscas para obtener un buen acabado e integridad superficiales y minimizar los defectos. La lubricación afecta la manera en que se deforma el material durante el proceso, una consideración importante debido a la posibilidad de que se desarrollen defectos internos. Por lo general, los dados hechos de acero endurecido son caros debido a su forma compleja. Además, los dados no pueden rectificarse luego de haberse desgastado. Sin embargo, con los materiales

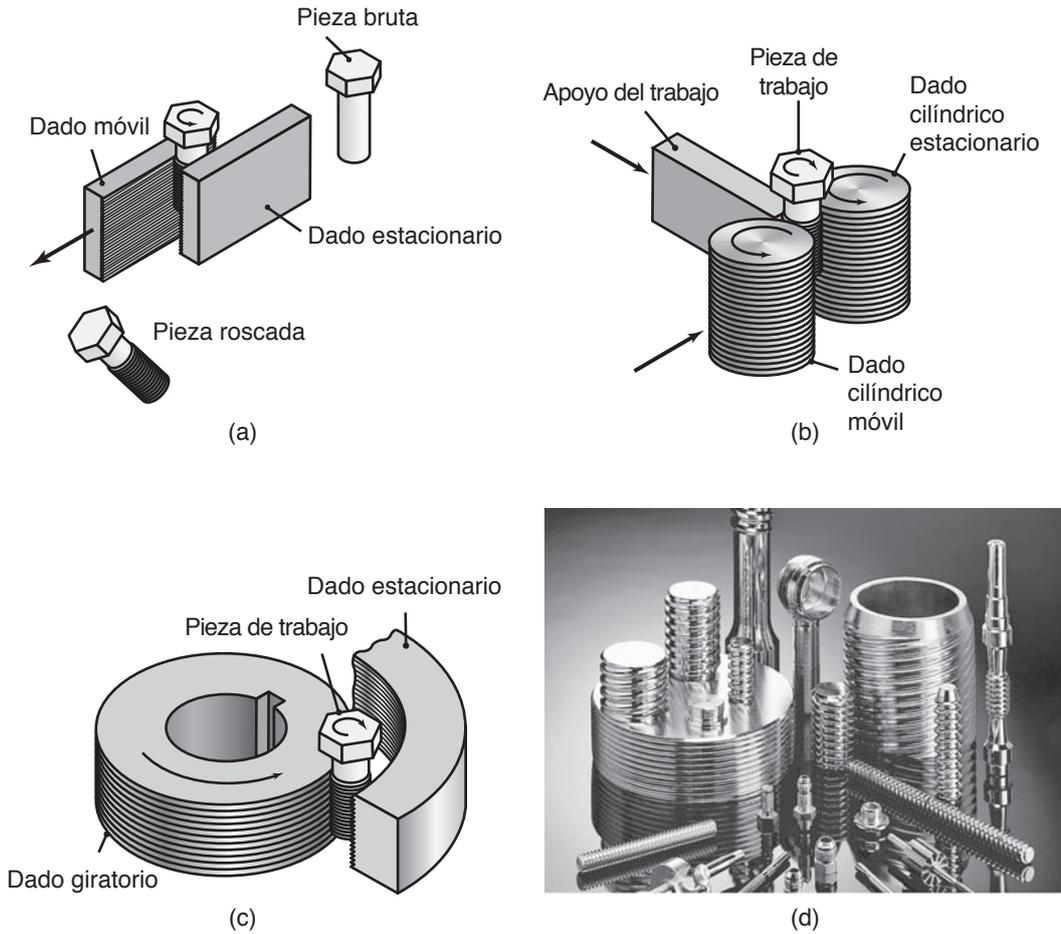


FIGURA 13.16 Procesos de laminación de roscas: (a) dados planos recíprocos usados para producir un tornillo; (b) dado de dos rodillos; (c) dado giratorio o planetario y (d) colección de piezas roscadas laminadas que se fabrican económicamente a altas tasas de producción. Fuente: (d) corteía de Tesker Manufacturing Corp., Saukville, Wisconsin.

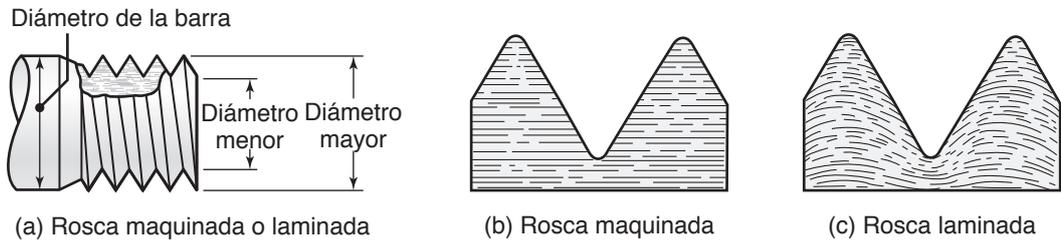


FIGURA 13.17 (a) Características de una rosca maquinada o laminada. Flujo de grano en las roscas (b) maquinada y (c) laminada. A diferencia del maquinado, que corta a través de los granos del metal, la laminación de roscas imparte una resistencia mejorada gracias al trabajo en frío y al favorable flujo del grano.

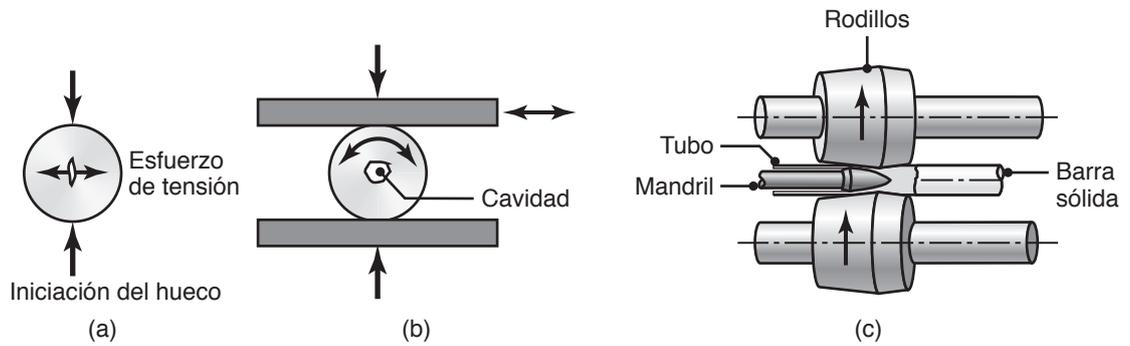


FIGURA 13.18 Formación de cavidad en un sólido, barra redonda y su utilización en el proceso de mandrilado de tubo giratorio para fabricar tubería sin costura (vea también la figura 2.9).

adecuados y la debida preparación del dado, la vida de éste puede llegar a ser hasta de millones de piezas.

Mandrilado de tubo giratorio. También conocido como **proceso de Mannesmann**, se trata de una operación de trabajo en caliente para fabricar *tubos largos de paredes gruesas y sin costura* (figura 13.18). Desarrollado en la década de 1880, este proceso tiene su base en el principio de que cuando una barra redonda se somete a fuerzas de compresión radiales, desarrolla esfuerzos de tensión en su centro (vea la figura 2.9). Cuando se somete de manera continua a estos esfuerzos de compresión cíclicos (figura 13.18b), la barra comienza a desarrollar una pequeña cavidad en su centro que luego comienza a crecer. Este fenómeno puede demostrarse con un pequeño trozo redondo de goma de borrar, al hacerlo rodar hacia adelante y hacia atrás sobre una superficie dura y plana, como se muestra en la figura 13.18b.

El mandrilado de tubo giratorio se lleva a cabo utilizando un arreglo de rodillos giratorios (figura 13.18c). Los ejes de los rodillos están *sesgados* con el fin de tirar de la barra

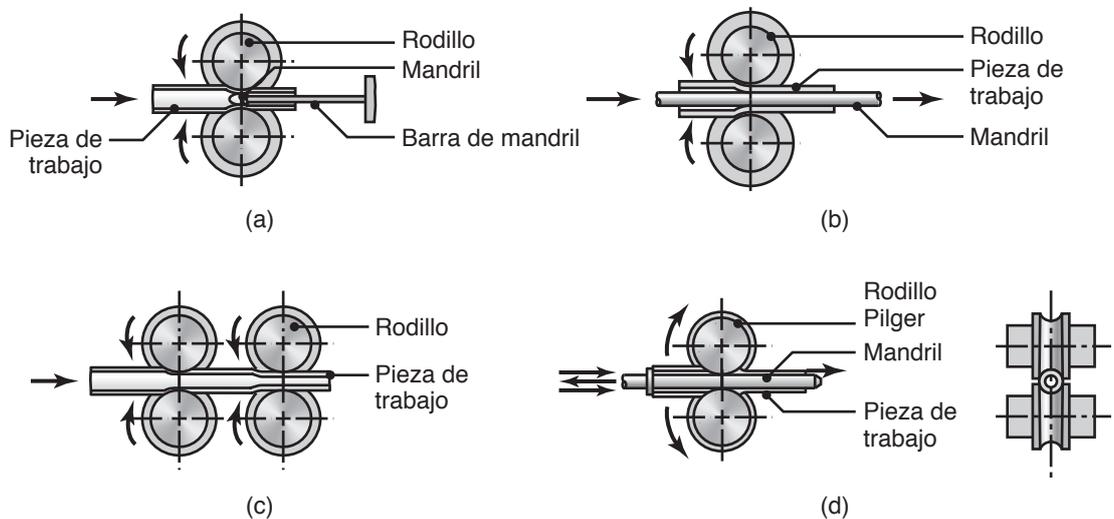


FIGURA 13.19 Ilustración esquemática de diversos procesos de laminación de tubos: (a) con un mandril fijo; (b) con un mandril flotante; (c) sin mandril y (d) laminación Pilger sobre un mandril y un par de rodillos para dar forma. Los diámetros y espesores del tubo también pueden cambiarse mediante otros procesos, como el trefilado, la extrusión y el rechazado.

redonda a través de los rodillos, gracias al componente axial del movimiento giratorio. Un mandril interno ayuda en la operación al expandir el agujero y darle dimensión al diámetro interior del tubo. El mandril puede mantenerse en su lugar mediante una barra larga o puede ser un mandril flotante, sin soporte (vea la figura 15.21c donde se muestra un mandril flotante similar que se utiliza en el trefilado). Debido a la severa deformación que experimenta la barra, la pieza bruta redonda debe ser de alta calidad y estar libre de inclusiones.

Laminación de tubos. El diámetro y el espesor de tubos y tuberías pueden reducirse mediante la *laminación de tubos*, la cual utiliza rodillos para dar forma, mismos que están dispuestos en diversas configuraciones (figura 13.19). Estas operaciones pueden llevarse a cabo con un mandril interno o sin mandril. En el *molino Pilger*, el tubo y un mandril interno se someten a movimiento recíproco; los rodillos tienen una conformación especial y son girados continuamente. Durante el ciclo de vacío en el rodillo, el tubo avanza y gira; con esto se inicia otro ciclo de reducción del tubo mediante el cual se le somete a una reducción de su diámetro y del espesor de su pared. Aplicando este proceso, se han producido tubos de acero con 265 mm (10.5 pulg) de diámetro. En el capítulo 15 describimos otras operaciones para la manufactura de tubos.

RESUMEN

- La laminación es el proceso de reducir el espesor o cambiar la sección transversal de una tira larga mediante las fuerzas de compresión aplicadas por un conjunto de rodillos. La laminación de forma o de perfiles se utiliza para hacer productos con diferentes secciones transversales. Otras operaciones de laminación incluyen la laminación de anillo y la laminación de roscas.
- La laminación se puede llevar a cabo a temperatura ambiente (laminación en frío) o a temperaturas elevadas (laminación en caliente). El procedimiento implica diferentes variables del material y del proceso, incluyendo el diámetro del rodillo (en relación con el espesor del material), la reducción por pasada, la velocidad, la lubricación y la temperatura. El ensanchado, la flexión y el aplanamiento son consideraciones importantes para controlar la precisión dimensional del material laminado.
- Los molinos de laminación tienen una variedad de configuraciones, como los molinos de dos rodillos, de tres rodillos, de cuatro rodillos, de conjunto o racimo (Sendzimir) y en tándem. Para reducir las fuerzas de rodillo, es posible aplicar tensiones frontales y/o posteriores al material.
- En la actualidad, la colada continua y la laminación de metales ferrosos y no ferrosos en productos semielaborados es una práctica común debido a sus beneficios económicos.
- Los molinos integrados son grandes instalaciones que involucran una secuencia completa de actividades, desde la producción de metal caliente en un alto horno hasta la colada y la laminación de productos terminados, listos para ser enviados al cliente. En una escala mucho más pequeña, los minimolinos utilizan chatarra metálica que se funde en hornos de arco eléctrico, se moldea y lamina en forma continua en líneas específicas de productos.

TÉRMINOS CLAVE

Bastidor	Estructura forjada	Laminación de conjunto	Laminación en tándem
Bastidor de rodillo	Forjado con rodillos	Laminación de forma o perfil	Laminación oblicua
Combadura	Lagartismo	Laminación de roscas	Laminación plana
Corona	Lámina	Laminación de tubos	Laminación Steckel
Ensayado	Laminación	Laminación en caliente	Mandrilado de tubo giratorio
Estructura de colada	Laminación de anillo	Laminación en frío	Minimolino

Molino de desbaste	Palanquilla	Proceso de Mannesmann	Tensión posterior
Molino de laminación	Papel aluminio	Punto neutro	Tocho
Molino Pilger	Pase	Rodillo	Traqueteo
Molino Sendzimir	Placa	Temple por laminación	
Número de calibre	Planchón	Tensión frontal	

BIBLIOGRAFÍA

- Ginzburg, V. B. y Ballas, R., *Flat Rolling Fundamentals*, CRC Press, 2001.
- Hosford, W. F. y Caddell, R. M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 4a. ed., Prentice Hall, 2011.
- Lee, Y., *Rod and Bar Rolling: Theory and Applications*. CRC Press, 2004.
- Lenard, J. G., *Primer on Flat Rolling*, Elsevier, 2007.
- Pittner, J. y Simaan, M. A., *Tandem Cold Metal Rolling Mill Control: Using Practical Advanced Methods*, Springer, 2010.
- Tschaetch, H., *Metal Forming Practise: Processes, Machines, Tools*, Springer, 2007.

PREGUNTAS DE REPASO

- 13.1** ¿Cuál es la diferencia entre una placa y una lámina?
- 13.2** Defina espacio de laminación, punto neutro y pase.
- 13.3** ¿Qué factores contribuyen al ensanchado en la laminación plana?
- 13.4** ¿Qué es el deslizamiento hacia adelante? ¿Por qué es importante?
- 13.5** Describa los tipos de deflexiones que experimentan los rodillos.
- 13.6** Describa la diferencia entre un tocho, un planchón y una palanquilla.
- 13.7** ¿Por qué la nivelación de rodillos puede ser una operación necesaria?
- 13.8** Liste los defectos que se observan comúnmente en la laminación plana.
- 13.9** ¿Cuáles son las ventajas de la laminación en tándem? ¿En la laminación de conjunto o racimo?
- 13.10** ¿Cómo se producen los tubos sin costura?
- 13.11** ¿Por qué el acabado superficial de un producto laminado es mejor con la laminación en frío que con la laminación en caliente?
- 13.12** ¿Qué es un molino de Sendzimir? ¿Cuáles son sus características más importantes?
- 13.13** ¿Qué es el proceso de Mannesmann? ¿En qué se distingue de la laminación de tubos?
- 13.14** Describa la laminación de anillo. ¿Existe un plano neutro en la laminación de anillo?
- 13.15** ¿Cómo se genera la tensión posterior?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 13.16** Explique por qué se inventó y desarrolló el proceso de laminación.
- 13.17** La laminación plana reduce el espesor de placas y láminas. En vez de eso, ¿es posible reducir su espesor trefilando simplemente el material? ¿Sería éste un proceso factible? Explique su respuesta.
- 13.18** Explique cómo se invierten los patrones de esfuerzo residual mostrados en la figura 13.9 cuando se cambia el radio del rodillo o la reducción por pasada.
- 13.19** Explique si sería práctico aplicar la técnica de nivelación de rodillos que se muestra en la figura 13.7a, a placas gruesas.
- 13.20** Describa los factores que influyen en la magnitud de la fuerza de laminación, F , en la figura 13.2c.
- 13.21** Explique cómo aplicaría usted tensiones frontales y posteriores a una hoja metálica durante su laminación. ¿Cómo haría para controlar estas tensiones?
- 13.22** ¿Qué se hace normalmente para asegurar que un producto laminado plano no desarrolle una corona?
- 13.23** Haga una lista de las piezas que pueden hacerse mediante (a) laminación de forma y (b) laminación de roscas.
- 13.24** Describa los métodos mediante los cuales puede reducirse el aplanamiento de los rodillos. ¿Qué propiedad o propiedades del material del rodillo pueden incrementarse para reducir su aplanamiento?
- 13.25** Se estableció que en la laminación plana el ensanchado se incrementa con (a) un aumento de la relación del ancho al espesor del material entrante, (b) una disminución de la fricción y (c) una disminución de la relación del radio del rodillo al espesor de la tira. Explique por qué es así.
- 13.26** La laminación plana puede llevarse a cabo aplicando sólo tensión frontal mediante el uso de rodillos locos (laminación Steckel). Puesto que el torque sobre los rodillos es entonces de cero, ¿de dónde proviene la energía para realizar el trabajo de deformación en la laminación?
- 13.27** Explique la consecuencia de aplicar una tensión posterior demasiado alta en la laminación.

13.28 Observe en la figura 13.3f que los rodillos impulsados (rodillos con energía) forman el tercer conjunto a partir del rodillo de trabajo. ¿Por qué no se suministra la energía a través del propio rodillo de trabajo? ¿Es posible? Explique su respuesta.

13.29 Describa la importancia de controlar la velocidad del rodillo, los espacios de laminación, la temperatura y otras variables del proceso en una operación de laminación en tándem, como la mostrada en la figura 13.11. Explique cómo determinaría usted la distancia óptima entre los bastidores.

13.30 En la figura 13.9a, si usted elimina la capa superior compresiva, por ejemplo mediante esmerilado, ¿la tira permanecerá plana? Si no es así, ¿de qué manera se curvará y por qué?

13.31 Mencione varios productos que puedan fabricarse mediante cada una de las operaciones mostradas en la figura 13.1.

13.32 Liste las posibles consecuencias de laminar a una (a) velocidad demasiado alta y (b) velocidad demasiado baja.

13.33 Se sabe que en la laminación de roscas, tal como se ilustra en la figura 13.16, una pieza de trabajo requiere aproximadamente de seis vueltas para formar la rosca. ¿Bajo qué condiciones (parámetros del proceso, geometría de la rosca o propiedades de la pieza de trabajo) puede presentarse una excepción a esta regla?

13.34 Si un molino de laminación manifiesta traqueteo, ¿cuáles parámetros del proceso cambiaría usted, y en qué orden? Explique.

13.35 ¿Puede el deslizamiento hacia adelante llegar a ser negativo? ¿Por qué sí o por qué no?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

13.36 En el ejemplo 13.1, calcule la fuerza de laminación y la potencia para el caso en que el material de la pieza es aluminio 1100-O y el radio del rodillo, R , es de 8 pulgadas.

13.37 Calcule los ángulos de salida individuales en cada uno de los bastidores de la operación de laminación en tándem que se muestra en la figura 13.11.

13.38 Estime la fuerza de laminación, F , y el torque para una tira de acero al carbono AISI 1020 que tiene 200 mm de ancho, 10 mm de espesor y se lamina hasta un espesor de 7 mm. El radio del rodillo es de 200 mm y gira a 200 rpm.

13.39 Bajo las condiciones mostradas en la figura P13.39, se lleva a cabo una operación de laminación. ¿Cuál es la posición, x_n , del punto neutro? Observe que las tensiones frontal y posterior no se han especificado. Se proporcionan los siguientes datos adicionales: el material es aluminio 5052-O; los rodillos son de acero endurecido; la rugosidad superficial de los rodillos es de $0.02 \mu\text{m}$; la temperatura de laminación es igual a 210°C .

13.40 Estime la fuerza de laminación y la potencia para una tira de acero recocido al bajo carbono, de 200 mm de ancho

y 10 mm de espesor, laminada hasta un espesor de 6 mm. El radio del rodillo es de 200 mm y el rodillo gira a 200 rpm; use $\mu = 0.1$.

13.41 Se realiza una operación de laminación plana donde $h_o = 0.20$ pulg, $h_f = 0.15$ pulg, $w_o = 10$ pulg, $R = 8$ pulg, $\mu = 0.25$ y el esfuerzo de flujo promedio del material es de 40 000 psi. Estime la fuerza de laminación y el torque; incluya los efectos del aplanamiento del rodillo.

13.42 Se puede demostrar que es posible determinar μ en la laminación plana sin medir el torque o las fuerzas. Con base en una inspección de las ecuaciones para la laminación, describa un procedimiento experimental para hacerlo. Tenga en cuenta que se le permite medir cualquier cantidad que no sea un torque o una fuerza.

13.43 Suponga que usted es un profesor que cubre los temas descritos en este capítulo y aplicará un examen de los aspectos numéricos para probar la comprensión de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

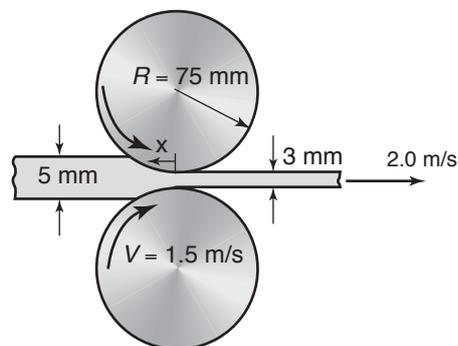


FIGURA P13.39

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

13.44 La figura 13.3c muestra un bosquejo simple del bastidor de un molino de cuatro rodillos. Haga un estudio en la literatura especializada y presente un bosquejo más detallado para tal bastidor donde muestre sus componentes principales.

13.45 Obtenga un pedazo suave y redondo de goma de borrar, como el del extremo de un lápiz, y duplique el proceso que se muestra en la figura 13.18b. Observe la forma en que la porción central de la goma comenzará a desintegrarse, produciendo un agujero burdo.

13.46 Si usted repite el experimento del problema 13.45 con una goma más dura, como la que se utiliza para borrar tinta, se dará cuenta de que toda la goma comienza a agrietarse y desmoronarse. Explique por qué sucede esto.

13.47 Diseñe un juego de rodillos para producir secciones transversales distintas a las mostradas en la figura 13.12.

13.48 Diseñe un procedimiento experimental para determinar el punto neutro en una operación de laminación plana.

13.49 Use un rodillo de cocina y cualquier masa disponible (para pan, galletas, etc.), de 100 mm por 100 mm por 8 mm, y cuantifique el ensanchado por laminación plana para diferentes reducciones del espesor.

13.50 Deduzca una expresión para la pieza de trabajo más gruesa que se puede estirar entre dos rodillos como una función del espacio de laminación, el radio del rodillo y el coeficiente de fricción.

Procesos y equipos para el forjado de metales

CAPÍTULO

14

- En este capítulo se describen los fundamentos del forjado y otros procesos relacionados, incluyendo su diseño y consideraciones económicas.
- Primero se estudian las operaciones de forjado en **dado** abierto para la producción de formas simples, seguidas por las operaciones de forjado con dado impresor y en dado cerrado para la producción de formas más complejas.
- Posteriormente se introducen diversas operaciones de forjado, como el cabeceado, penetrado, acuñado, recalado rotativo y la extrusión en frío.
- Se explican los factores que intervienen en los defectos del forjado y en las fallas de los dados.
- También se analiza la economía del forjado y su relación con el proceso de selección del material de los dados.
- El capítulo finaliza con una revisión del diseño de las piezas que se forjarán, de los lineamientos a seguir para el diseño y la manufactura de los dados y de la selección de los materiales para dados y los lubricantes para las operaciones de forjado.

Piezas típicas hechas mediante forjado y otros procesos relacionados: flechas, engranes, pernos, álabes de turbina, herramientas manuales, dados y componentes para maquinaria, transportación y equipo agrícola.

Procesos alternativos: fundición, metalurgia de polvos, maquinado y fabricación.

14.1 Introducción

El **forjado** es un proceso básico en el que la pieza de trabajo se conforma aplicándole fuerzas de compresión a través de diversos dados y herramientas. Como una de las operaciones metalúrgicas más antiguas e importantes, que se remonta al menos al año 4000 a. C., el forjado se utilizó primero para hacer joyas, monedas y diversos implementos mediante el martillado de metal con herramientas hechas de piedra. En la actualidad las piezas forjadas incluyen grandes rotores para turbinas, engranajes, cubiertos (figura 14.1a), herramientas manuales, piezas para maquinaria, aeronaves (figura 14.1b), ferrocarriles y equipos de transporte.

A diferencia de las operaciones de laminado, descritas en el capítulo 13, que generalmente producen placas continuas, láminas, tiras y diferentes secciones transversales estructurales, las operaciones de forjado producen piezas discretas. Debido a que el flujo de metal en un dado y la estructura de grano del material pueden controlarse, las piezas forjadas tienen buena resistencia y tenacidad y son muy confiables para aplicaciones críticas y son sometidas a grandes esfuerzos (figura 14.2). Las operaciones de forjado simple pueden realizarse con un martillo pesado y un yunque, como lo han hecho tradicionalmente los herreros. La mayoría de las piezas forjadas requieren un conjunto de dados y matrices y equipos tales como una prensa o martillos eléctricos.

- 14.1 **Introducción** 337
- 14.2 **Forjado en dado abierto** 339
- 14.3 **Forjado con dado impresor y en dado cerrado** 342
- 14.4 **Diversas operaciones de forjado** 345
- 14.5 **Forjabilidad de los metales; defectos de forjado** 349
- 14.6 **Diseño de dados, materiales para dados y lubricación** 351
- 14.7 **Métodos para la fabricación de dados y fallas en los dados** 354
- 14.8 **Máquinas de forjado** 355
- 14.9 **Economía del forjado** 358

EJEMPLO:

- 14.1 **Cálculo de la fuerza de forjado en el recalado** 341

CASOS DE ESTUDIO:

- 14.1 **Manufactura de un pasador escalonado mediante las operaciones de cabeceado y penetrado** 347
- 14.2 **Componentes de la suspensión del automóvil Lotus Elise** 359



Código QR 14.1 ¿Qué es el forjado? (Fuente: Cortesía de Forging Industry Association, www.forging.org).

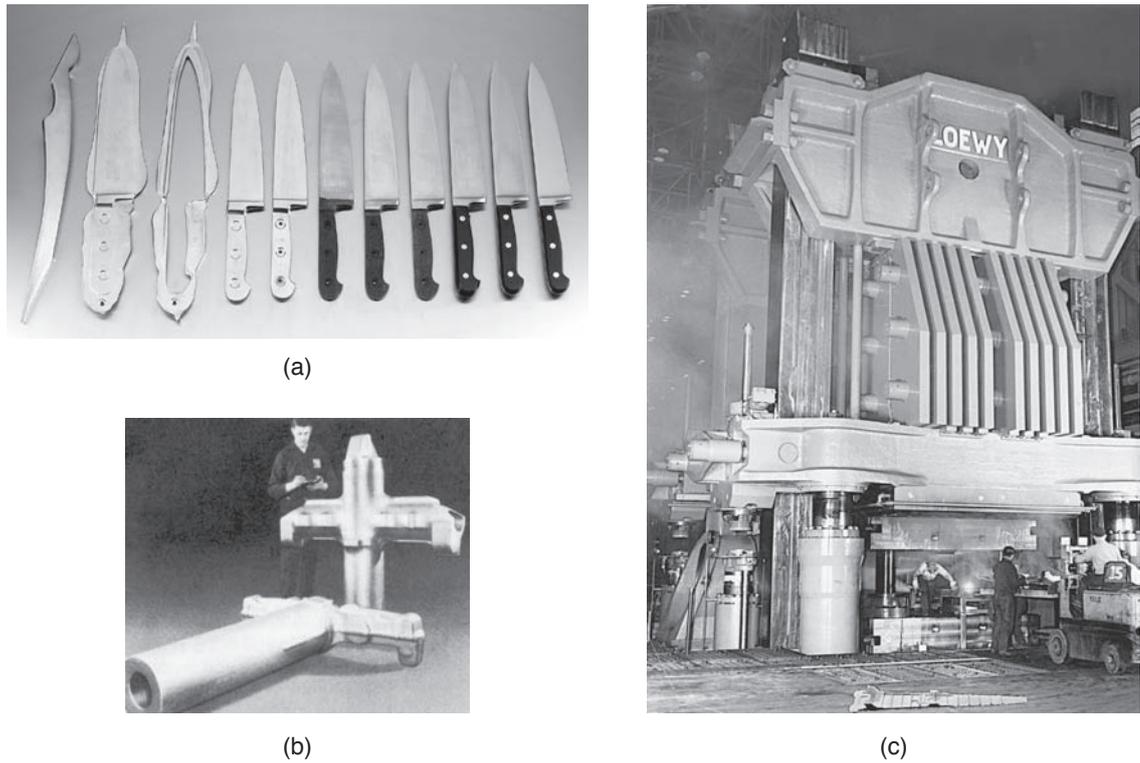


FIGURA 14.1 (a) Ilustración de los pasos involucrados en el forjado de un cuchillo. (b) Componentes hechos mediante forjado para el tren de aterrizaje de los aviones C5A y C5B. (c) Vista general de una prensa hidráulica 445 -MN (de 50 000 ton). Fuente: (a) Cortesía de Mundial, LLC. (b) y (c) Cortesía de Wyman-Gordon Company.

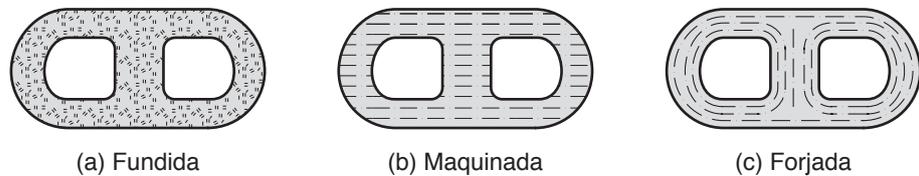


FIGURA 14.2 Ilustración esquemática de una pieza (eslabón de una cadena de arrastre, mide aproximadamente 2 m de largo) fabricada mediante tres procesos diferentes y que muestra el flujo del grano. Cada proceso tiene sus propias ventajas y limitaciones con respecto a las características externas e internas, las propiedades del material, la precisión dimensional, el acabado superficial y la economía de la producción. Fuente: Cortesía de la Forging Industry Association.

El forjado puede llevarse a cabo a temperatura ambiente (*forjado en frío*) o a temperaturas elevadas (*forjado en tibio* o *en caliente*), dependiendo de la temperatura homogénea, la cual se describe en la sección 1.8. El forjado en frío requiere fuerzas más altas debido a la mayor resistencia del material de la pieza, el cual también puede poseer la suficiente ductilidad a temperatura ambiente como para poder someterlo a la deformación requerida sin agrietarse. Las piezas forjadas en frío tienen buen acabado superficial y buena precisión dimensional. El forjado en caliente requiere fuerzas menores, pero la precisión dimensional y el acabado superficial de las piezas no son tan buenos como los del forjado en frío.

Las piezas forjadas suelen someterse a operaciones de acabado adicionales, como el tratamiento térmico para modificar sus propiedades y el maquinado para lograr precisión en las dimensiones finales y un buen acabado superficial. Las operaciones de acabado pueden minimizarse mediante el forjado de precisión, que es un ejemplo importante de los procesos de *formado de forma neta* o *forma casi neta*. Como se describe a lo largo de este libro, las piezas que pueden forjarse con éxito pueden también fabricarse económicamente utilizando otros métodos, como la fundición (capítulo 11), la metalurgia de polvos (capítulo 17) o el maquinado (parte IV). Cada uno de estos métodos producirá una pieza con características diferentes, particularmente en lo que respecta a resistencia, tenacidad, precisión dimensional, acabado superficial y la posibilidad de que presente defectos internos o externos.

14.2 Forjado en dado abierto

El *forjado en dado abierto* es la operación de forja más simple (tabla 14.1). Aunque la mayoría de las piezas forjadas en dado abierto suelen pesar entre 15 y 500 kg (30 y 1000 lb), se han hecho forjas de hasta 300 toneladas. Los tamaños de las piezas pueden variar desde muy pequeños (como alfileres, clavos y pernos) hasta muy grandes [ejes para hélices de barco de hasta 23 m (75 pies) de largo]. El forjado en dado abierto puede describirse en forma simple como una pieza metálica (en bruto o tocho), colocada entre dos dados planos, cuya altura se reduce por compresión (figura 14.3); este proceso se denomina **recalcado** o **forjado con dado plano**. Las superficies del dado pueden tener cavidades poco profundas o características que producen formas relativamente simples.

En la figura 14.3b se muestra la deformación de una pieza de trabajo en condiciones libres de *fricción*. Debido a que se mantiene la constancia del volumen, cualquier reducción en la altura incrementa el diámetro de la pieza forjada. En la figura, observe que la pieza de trabajo se deforma de manera uniforme: sin embargo, en operaciones reales existe fricción en las interfases del dado con la pieza de trabajo y la pieza desarrolla una forma tipo barril (figura 14.3c), un modo de deformación que también se conoce como *pancaking*.

El **abarrilamiento** es causado principalmente por las fuerzas de fricción que se oponen al flujo hacia el exterior de la pieza de trabajo en sus interfases con el dado, por lo que puede reducirse al mínimo mediante el uso de un lubricante eficaz. El abarrilamiento



Código QR 14.2 Operaciones de forjado en dado abierto. (Fuente: Cortesía de la Forging Industry Association, www.forging.org).



Código QR 14.3 Animación del forjado en dado abierto. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

TABLA 14.1

Características generales de los procesos de forjado		
Proceso	Ventajas	Limitaciones
Dado abierto	Dados simples y de bajo costo; gran variedad de tamaños de piezas; buenas características de resistencia; generalmente para pequeñas cantidades.	Se limita a formas simples; difícil de mantener tolerancias estrechas; se requiere aplicar maquinado para lograr la forma final; baja tasa de producción; relativamente pobre utilización del material; necesita un alto grado de habilidad.
Dado cerrado	Relativamente buena utilización del material; por lo general, mejores propiedades que las piezas forjadas en dado abierto; buena precisión dimensional; altas tasas de producción; buena reproducibilidad.	Alto costo del dado; no resulta económico para pequeñas cantidades; a menudo requiere maquinado.
Bloqueador	Bajos costos de dado; altas tasas de producción.	Necesita maquinado para lograr la forma final; piezas con almas gruesas y filetes grandes.
Convencional	Requiere mucho menos maquinado que el tipo bloqueador; altas tasas de producción; buena utilización del material.	Costo de dado más alto que para el tipo bloqueador.
De precisión	Tolerancias dimensionales estrechas; es posible fabricar mallas y bridas muy finas; generalmente no requiere maquinado; muy buena utilización del material.	Altas fuerzas de forjado, dados intrincados y previsiones para retirar la forja de los dados.

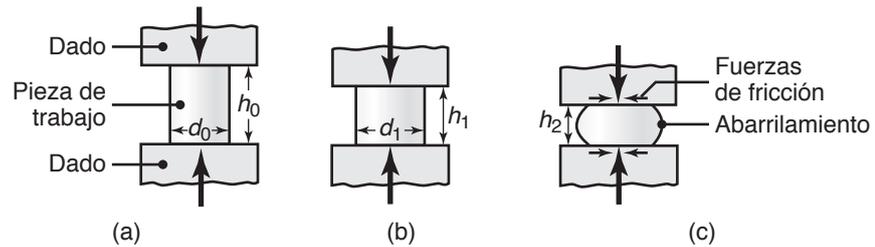


FIGURA 14.3 (a) Palanquilla cilíndrica sólida recalca entre dos dados planos. (b) Deformación uniforme de la palanquilla sin fricción. (c) Deformación con fricción; observe el abarrilamiento de la palanquilla causado por las fuerzas de fricción en las interfaces de la palanquilla con el dado.

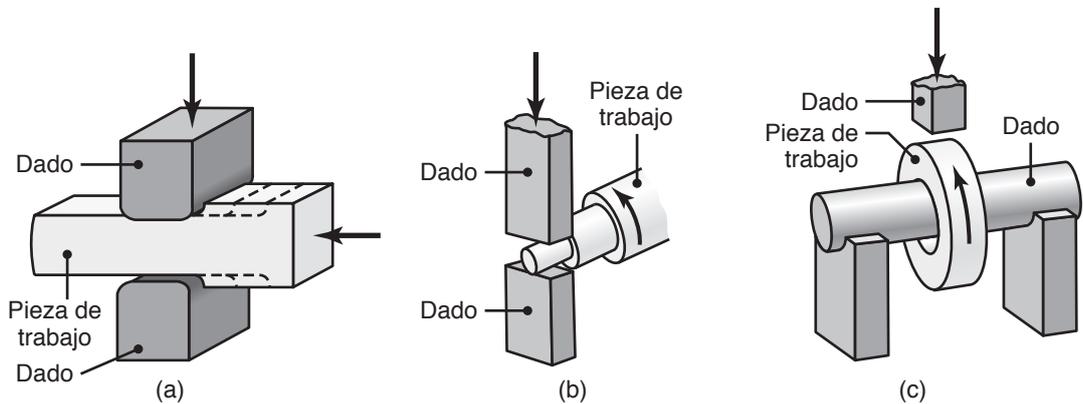


FIGURA 14.4 (a) Ilustración esquemática de una operación de forja de desbaste en una barra rectangular. Los herreros utilizan este proceso para reducir el grosor de las barras mediante el martillado de la pieza sobre un yunque; la reducción del grosor está acompañada de abarrilamiento. (b) Reducción del diámetro de una barra mediante forjado en dado abierto; observe los movimientos de los dados y de la pieza de trabajo. (c) Reducción del grosor de un anillo por forjado en dado abierto.

puede desarrollarse también al recalcar piezas calientes entre dados fríos. El material se enfría rápidamente en las superficies del dado, mientras que el resto se mantiene relativamente caliente y, en consecuencia, en las partes superior e inferior de la pieza de trabajo el material tiene mayor resistencia a la deformación que el material del centro. Como resultado, la porción central de la pieza de trabajo se expande lateralmente en una mayor medida de lo que lo hacen los extremos. El abarrilamiento por efectos térmicos puede reducirse o eliminarse mediante el uso de dados calentados. Para este propósito, pueden emplearse también barreras térmicas, como tela de vidrio en las interfaces del dado con la pieza de trabajo.

La *forja de desbaste a martillo*, también llamada *forja de reducción*, es una operación de forjado en dado abierto en la que el grosor de una barra se reduce mediante pasos sucesivos de forjado (*piquetes*) a intervalos específicos (figura 14.4a). El grosor de las barras y los anillos también puede reducirse por medio de técnicas de forjado en dado abierto similares, como se ilustra en las figuras 14.4b y c. Debido a que el área de contacto entre el dado y la pieza de trabajo es pequeña, es posible reducir de este modo el grosor de una sección larga de una barra sin necesidad de grandes fuerzas o maquinaria pesada. Tenga en cuenta que los herreros han estado realizando este tipo de operaciones en piezas calientes durante siglos utilizando sólo un martillo y un yunque. La forja de desbaste a martillo de piezas más grandes suele hacerse usando equipo mecanizado y controles por computadora, donde los movimientos laterales y verticales de los dados se coordinan para producir la forma deseada de la pieza.

Fuerza de forjado. La fuerza de forjado, F , necesaria en una operación de forjado en dado abierto sobre una pieza de trabajo cilíndrica sólida puede estimarse a partir de la fórmula

$$F = Y_f \pi r^2 \left(1 + \frac{2\pi r}{3h} \right), \quad (14.1)$$

donde Y_f es el **esfuerzo de flujo** del material (vea el ejemplo 14.1), μ es el coeficiente de fricción entre la pieza de trabajo y el dado y r y h son, respectivamente, el radio y la altura instantáneos de la pieza de trabajo.

Colina de rozamiento. Considere el recalco de un cilindro sólido, como se describe en la figura 14.3. Si la interfase de la pieza de trabajo con el dado carece de fricción, entonces la presión del dado es igual al esfuerzo de flujo del material. Si hay fricción presente, como es el caso en las operaciones de forjado reales, entonces el cálculo de la presión del dado es más complicado. Para recalcar un cilindro con radio exterior r_o , altura h y coeficiente de fricción μ , la presión del dado en cualquier radio se puede expresar como

$$p = Y e^{2\mu(r_o - r)/h}. \quad (14.2)$$

La distribución de la presión del dado se grafica en la figura 14.5. Observemos que la presión es máxima en el centro de la pieza de trabajo y que puede ser muy alta, especialmente si la relación de diámetro a altura de la pieza de trabajo es grande. Dada su forma, a la curva de distribución de la presión mostrada en la figura 14.5 se le llama *colina de rozamiento*.

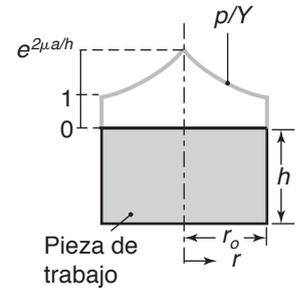


FIGURA 14.5 Distribución de la presión del dado en el recalco con fricción por deslizamiento. Observe que en el radio exterior la presión es igual al esfuerzo de flujo, Y , del material. La fricción por deslizamiento significa que el esfuerzo de fricción es directamente proporcional al esfuerzo normal.

EJEMPLO 14.1 Cálculo de la fuerza de forjado en el recalco

Dado: Una pieza de trabajo cilíndrica y sólida de acero inoxidable 304 tiene 150 mm (6 pulg) de diámetro y 100 mm (4 pulg) de altura. Su altura se reduce en 50%, a temperatura ambiente, mediante forjado en dado abierto con dados planos. Suponga que el coeficiente de fricción es de 0.2.

Se solicita: Calcular la fuerza de forjado al final de la carrera.

Respuesta: La fuerza de forjado al final de la carrera se calcula usando la ecuación (14.1), donde las dimensiones son las propias dimensiones finales de la forja. La altura final es $h = 100/2 = 50$ mm y el radio final, r , se determina a partir de la constancia del volumen al igualar los volúmenes antes y después de la deformación. Por lo tanto,

$$(\pi)(75)^2(100) = (\pi)(r)^2(50).$$

Entonces, $r = 106$ mm (4.17 pulg).

En la ecuación (14.1), la cantidad Y_f representa el esfuerzo de flujo del material, que es el esfuerzo requerido para continuar la deformación plástica de la pieza de trabajo hasta una verdadera deformación en particular. El valor absoluto de la deformación verdadera

que sufre la pieza de trabajo al final de la carrera en esta operación es

$$\epsilon = \ln\left(\frac{100}{50}\right) = 0.69.$$

Es posible determinar el esfuerzo de flujo del material remitiéndonos a la ecuación (2.8) y observando en la tabla 2.3 que, para el acero inoxidable 304, $K = 1275$ MPa y $n = 0.45$. Por lo tanto, para una deformación verdadera de 0.69, el esfuerzo de flujo se calcula en 1100 MPa. Otro método consiste en remitirnos a la figura 2.5 y observar que el esfuerzo de flujo para el acero inoxidable 304 en una deformación verdadera de 0.69 es de aproximadamente 1000 MPa (140 ksi). La pequeña diferencia entre los dos valores se debe a que los datos de la tabla 2.3 y de la figura 2.5 provienen de fuentes distintas.

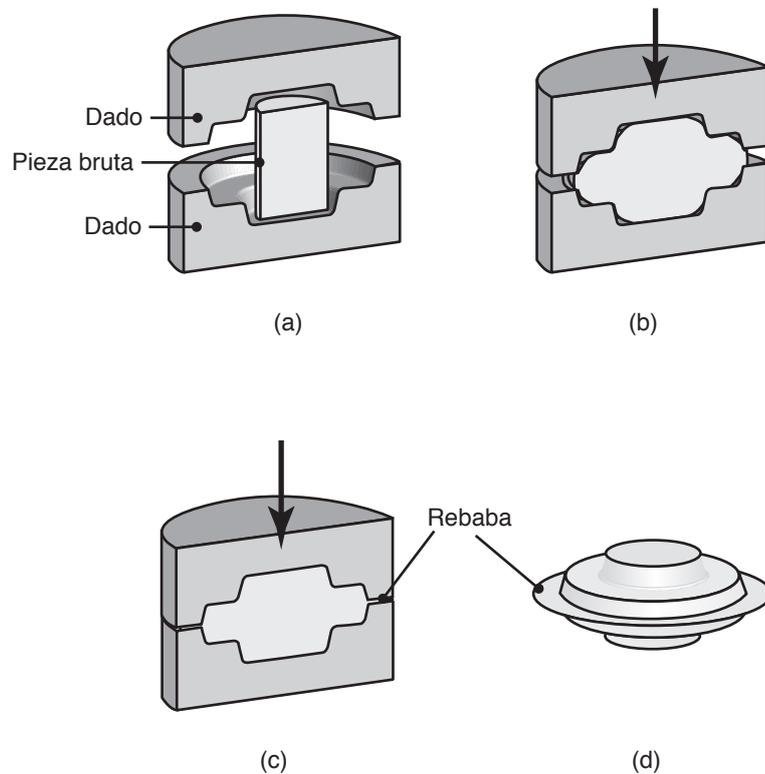
Tomando el último valor para el esfuerzo de flujo, ya es posible calcular la fuerza de forjado teniendo en cuenta que en este problema las unidades de la ecuación (14.1) deben estar en N y m. Por lo tanto,

$$F = (1000 \times 10^6)(\pi)(0.106)^2(1) + \frac{(2)(0.2)(0.106)}{(3)(0.050)} \\ = 4.5 \times 10^7 \text{ N} = 45 \text{ MN} = 10^7 \text{ lb} = 5000 \text{ tons.}$$

14.3 Forjado con dado impresor y en dado cerrado

En el *forjado con dado impresor*, la pieza de trabajo toma la forma de la cavidad del dado mientras se forja entre dos dados conformados (figura 14.6a a c). Por lo general, este proceso se realiza a temperaturas elevadas con el fin de reducir las fuerzas de forjado y desarrollar mayor ductilidad de la pieza de trabajo. Observe en la figura 14.6c que, durante la deformación, una parte del material fluye hacia el exterior y forma una rebaba.

La rebaba tiene un papel importante en el forjado con dado impresor: la alta presión y la alta resistencia a la fricción que resultan en la rebaba presentan una restricción severa sobre cualquier flujo radial del material hacia fuera del dado. Esto se debe al efecto



Código QR 14.4 Video del forjado con dado impresor. (Fuente: Cortesía de la Forging Industry Association, www.forging.org).

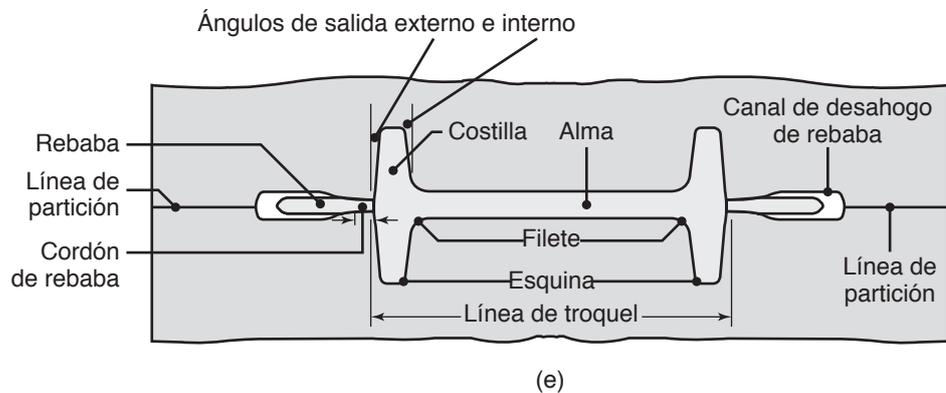


FIGURA 14.6 (a) a (d) Etapas del forjado con dado impresor de una palanquilla sólida y redonda; observe la formación de rebaba, la cual es metal en exceso que se troquea posteriormente. (e) Terminología estándar para las diferentes características de un dado de forja.

de la colina de rozamiento descrita en la sección 14.2. Por lo tanto, con base en el principio de que, en la deformación plástica, el material fluye en la dirección de menor resistencia (porque requiere menos energía), el material fluye preferentemente hacia la cavidad del dado hasta llenarlo por completo.

La terminología estándar para una forja en dado típico se muestra en la figura 14.6e. En lugar de ser hechos como una sola pieza, los dados pueden hacerse con varias piezas (segmentados), incluyendo insertos de dado (figura 14.7), y en particular para componentes que tengan formas complejas. Los insertos pueden reemplazarse fácilmente en caso de desgaste o falla en una región particular del dado y, por lo general, están hechos de materiales más resistentes y más duros.

La pieza en bruto, o tocho, que será forjada se prepara mediante (a) *recorte* (cizallamiento, sección 16.2) de una barra extruida o trefilada; (b) *metalurgia de polvos* o *fundición*, o bien (c) una pieza en bruto preformada a partir de una operación de forjado previa. La pieza en bruto se coloca en el dado inferior y, a medida que el dado superior comienza a descender, su forma cambia gradualmente (figura 14.8a).

Las **operaciones de preformado** (figuras 14.8b y c) se utilizan normalmente para mejorar la distribución del material en diferentes regiones de la pieza original usando dados simples de varios contornos. En el **formado con dado cóncavo**, el material se distribuye lejos de cierta región de los dados. En el **formado con dado convexo** (recalcado), el dado se junta en una región localizada. A continuación, se le da la forma aproximada a la pieza, mediante un proceso llamado **bloqueo**, utilizando *dados bloqueadores*. La última operación es el acabado de la forja en *dados de impresión* que le dan su forma final; la rebaba se retira más tarde mediante una operación de troquelado (figura 14.9).

Fuerza de forjado. La *fuerza de forjado*, F , necesaria en una operación de *forja* mediante *dado impresor* puede estimarse a partir de la fórmula

$$F = kY_f A, \tag{14.3}$$

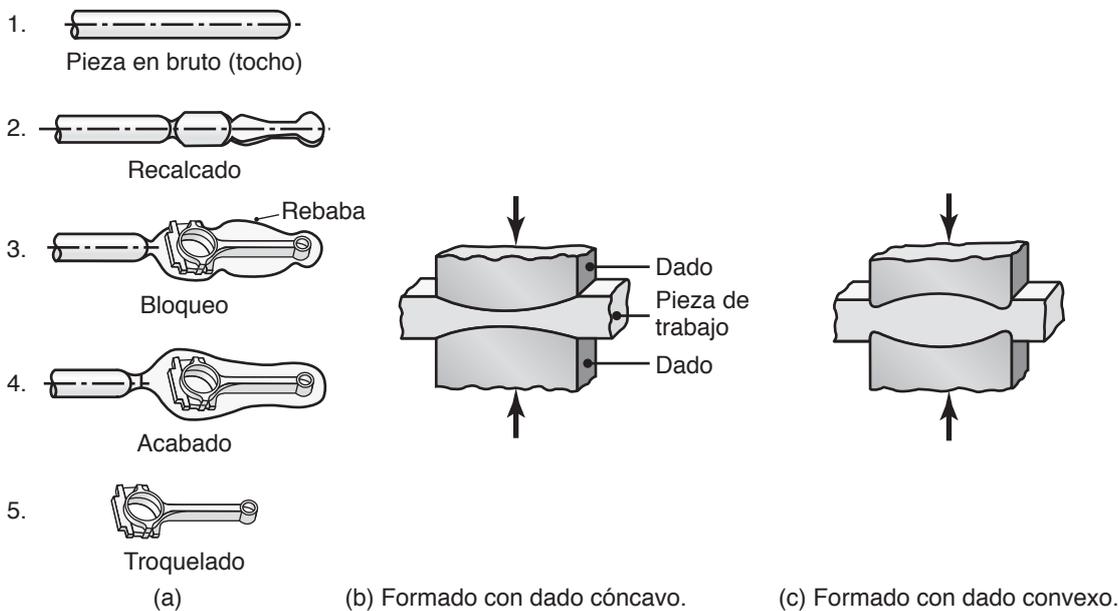


FIGURA 14.8 (a) Etapas en el forjado de una biela para un motor de combustión interna; observe la cantidad de rebaba necesaria para asegurar el llenado correcto de las cavidades del dado. Operaciones de formado (b) con dado cóncavo y (c) con dado convexo para distribuir adecuadamente el material, preformando la pieza en bruto para el forjado.

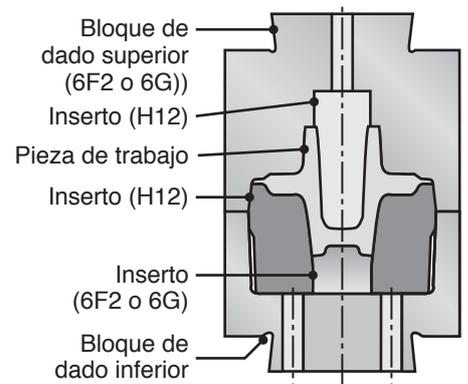


FIGURA 14.7 Insertos de dado utilizados en la forja de una carcasa para el eje de un automóvil (vea en la sección 5.7 los materiales que se utilizan para fabricar dados).

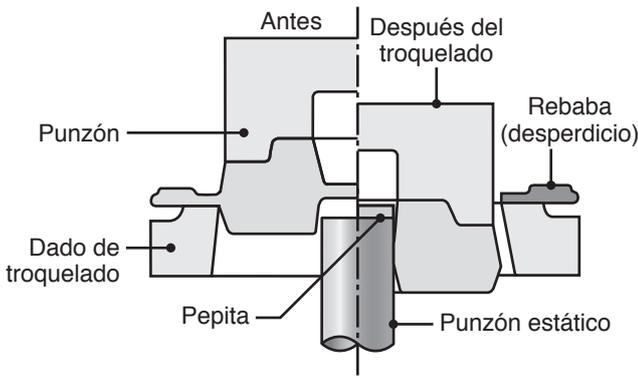


FIGURA 14.9 Troquelado de rebaba en una pieza forjada; al centro de la figura, observe que el material delgado (pepita) se elimina por punzonado.

TABLA 14.2

Rango de k valores para la ecuación (14.3)	
Forma	k
Formas simples, sin rebaba	3-5
Formas simples, con rebaba	5-8
Formas complejas, con rebaba	8-12

donde k es un factor multiplicador, obtenido a partir de la tabla 14.2, Y_f es el esfuerzo de flujo del material a la temperatura de forjado y A es el área proyectada del forjado, incluyendo la zona de rebaba.

En las operaciones de forjado en caliente, la presión de forjado real para la mayoría de los metales varía típicamente de 550 a 1000 MPa (80 a 140 ksi). Como un ejemplo, suponga que el esfuerzo de flujo de un material a la temperatura de forjado es de 100 000 psi, y que cierta pieza (como la mostrada en la figura 14.8a) tiene un área proyectada (con rebaba) de 60 pulg². Tomando un valor de $k = 10$ de la tabla 14.2, la fuerza de forjado sería $F = (10)(100\,000)(60) = 60 \times 10^6$ lb, o 26.8 toneladas.

Forjado en dado cerrado. El proceso que se muestra en la figura 14.6 también se conoce como *forjado en dado cerrado*. Sin embargo, en el forjado en dado cerrado real, no se forma rebaba (de ahí el término *forjado sin rebaba*)

y la pieza de trabajo llena completamente la cavidad del dado (vea el lado derecho de la figura 14.10b). El control preciso del volumen de la pieza en bruto y el diseño adecuado de los dados son esenciales para la producción de una pieza forjada con las tolerancias dimensionales requeridas. Las piezas en bruto con tamaño insuficiente impiden el llenado completo de la cavidad del dado; por el contrario, las piezas en bruto de gran tamaño generan presiones excesivas y pueden causar que los dados fallen prematuramente o que la máquina se atasque.

Forjado de precisión. Con el fin de reducir el número de operaciones de acabado adicionales (y por lo tanto el costo), continúa la tendencia hacia el logro de una mayor precisión en los productos forjados (formado de forma neta). Los productos forjados con precisión típicos son engranes, bielas y álabes para turbina. El forjado de precisión requiere (a) dados especiales y más complejos, (b) un control preciso del volumen y de la forma de la pieza en bruto y (c) la colocación exacta de la pieza en bruto dentro de la cavidad del dado. Asimismo, debido a las fuerzas más altas que se necesitan para obtener detalles finos en la pieza, el forjado de precisión requiere un equipo de mayor capacidad. Aunque el acero y el titanio también pueden forjarse a precisión, las aleaciones de aluminio y magnesio son particularmente adecuadas debido a las cargas de forjado y las temperaturas relativamente bajas que requieren; sin embargo, los aceros y el titanio también pueden forjarse a precisión.

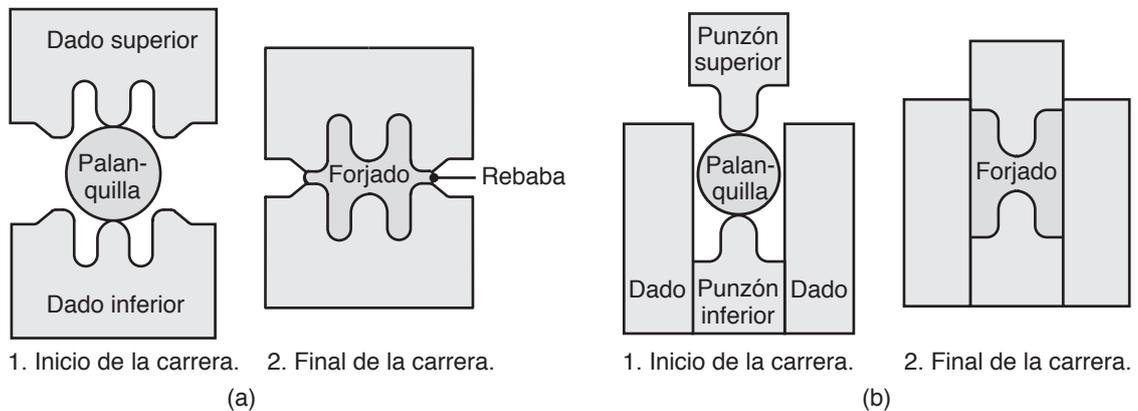


FIGURA 14.10 Comparación de (a) el forjado en dado cerrado con rebaba y (b) el forjado de precisión sin rebaba de una palanquilla redonda. Fuente: Según H. Takemasu, V. Vazquez, B. Painter y T. Altan.

Práctica del forjado y calidad del producto. Una operación de forjado implica típicamente la siguiente secuencia de pasos:

1. Se prepara un tocho, palanquilla o preforma; si es necesario, limpiada por medios tales como el granallado.
2. Para el forjado en caliente, la pieza de trabajo se calienta en un horno adecuado y después, si es necesario, se descascara con un cepillo de alambre, chorro de agua, vapor o mediante raspado. Cierta descascarado también puede ocurrir durante las etapas iniciales del forjado, cuando cáscaras gruesas y frágiles se caen por efectos de la propia operación de forjado.
3. Para el forjado en caliente, los dados se precalientan y lubrican; para el forjado en frío, la pieza en bruto se lubrica.
4. La palanquilla se forja en dados apropiados y en el orden adecuado. Si es necesario, se elimina cualquier exceso de material (especialmente la rebaba) mediante troquelado, maquinado o rectificadado.
5. La forja se limpia, se comprueban sus dimensiones y, en caso necesario, se maquina o rectifica a las dimensiones finales, con las tolerancias y el acabado superficial especificados.
6. Se realizan operaciones adicionales, como enderezado y tratamiento térmico (para obtener propiedades mecánicas mejoradas), así como cualesquiera operaciones de acabado adicionales que pudieran ser necesarias.
7. La forja se inspecciona en busca de defectos externos e internos.

La calidad, la tolerancia dimensional y el acabado superficial de un forjado dependen de lo bien que se hayan llevado a cabo estas operaciones. En general, las tolerancias dimensionales oscilan entre ± 0.5 y $\pm 1\%$ de las dimensiones de la forja. En las buenas prácticas, las tolerancias del acero forjado en caliente suelen ser menores a ± 6 mm (0.25 pulg) y, en el forjado de precisión, pueden ser tan bajas como ± 0.25 mm (0.01 pulg). Otros factores que contribuyen a las imprecisiones dimensionales son los ángulos de salida, radios, filetes, el desgaste de los dados, el cierre de los dados (si se cerraron correctamente o no) y falta de alineación de los dados.

14.4 Diversas operaciones de forjado

A continuación se describen otras diversas operaciones relacionadas con el proceso básico de forjado.

Acuñado. Un proceso de forjado en dado cerrado, el *acuñado*, se utilizó originalmente en la fabricación de monedas, medallas y joyas (figura 14.11); en la actualidad se utiliza para producir un amplio rango de piezas de alta precisión, como engranes, juntas industriales y dispositivos médicos. La pieza en bruto se acuña en la cavidad de un dado completamente cerrado con el fin de producir detalles finos, como en las monedas; las presiones requeridas pueden ser tan altas como cinco o seis veces la resistencia del material. En algunas piezas pueden requerirse varias operaciones de acuñado. En el proceso de acuñado no deben aplicarse lubricantes, ya que pueden quedar atrapados en las cavidades del dado y, al no ser compresibles, impedir la reproducción completa de los detalles de la superficie del dado y del acabado superficial.

El **marcado** de piezas con letras y números también puede hacerse rápidamente aplicando el acuñado. El **calibrado** es un procedimiento que se utiliza en el forjado y otros procesos para mejorar el acabado superficial e impartir la precisión dimensional deseada con poco o ningún cambio en el tamaño de la pieza.

Cabeceado. También se le llama *forja por recalado*; el *cabeceado* es, esencialmente, una operación de recalado efectuada en el extremo de una barra o un alambón con el fin de aumentar su sección transversal. Los productos típicos son clavos, cabezas de pernos, tornillos, remaches y otros diversos sujetadores (figura 14.12). El cabeceado puede realizarse en frío, tibio o caliente. Una consideración importante en el cabeceado es la tendencia de la barra a *pandearse* si su relación de la longitud sin soporte al diámetro es

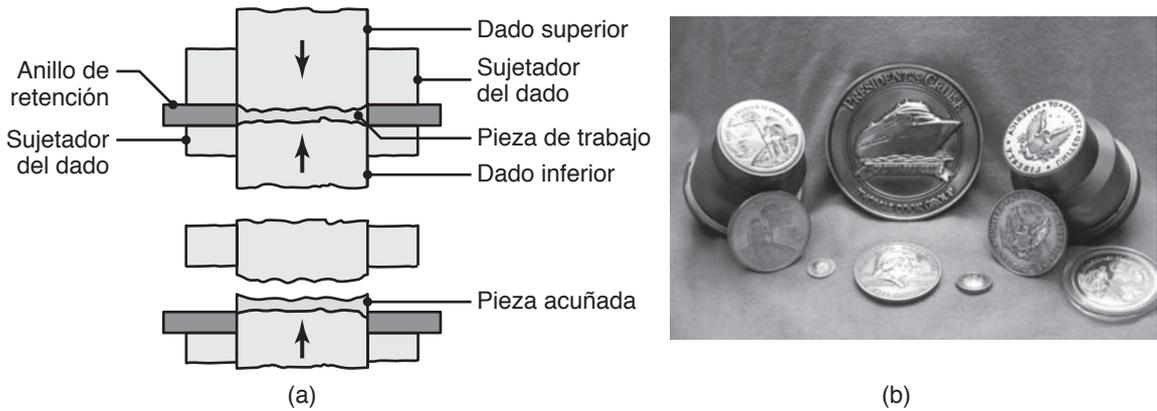


FIGURA 14.11 (a) Ilustración esquemática del proceso de acuñado; las primeras monedas (vea la tabla I.2) se hacían por forjado en dado abierto y carecían de precisión y detalles finos. (b) Ejemplo de una operación de acuñado moderna, donde se muestran las monedas y las herramientas; observe el detalle y el acabado superficial superiores que pueden lograrse en este proceso. Fuente: Cortesía de C & W Steel Stamp Company Inc.

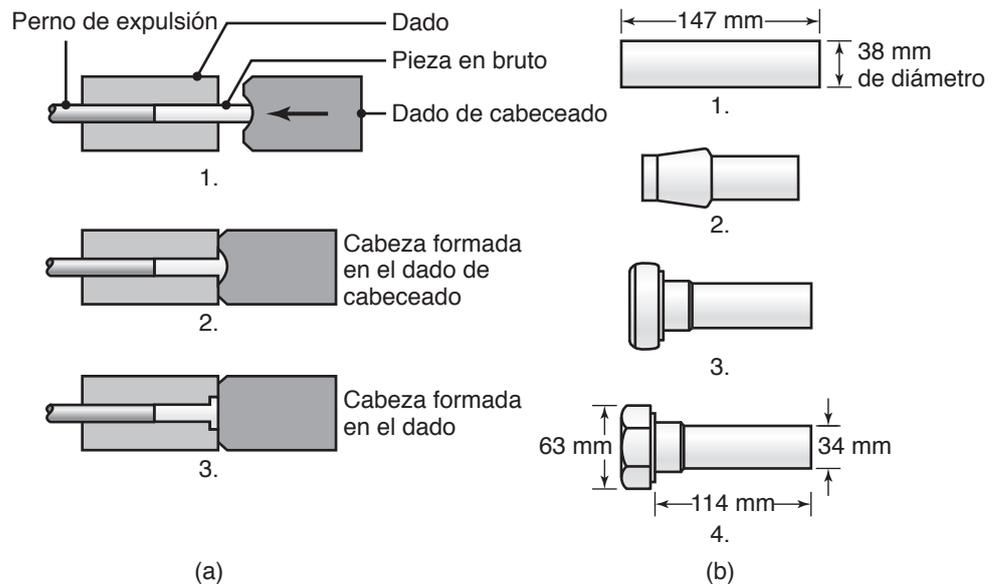
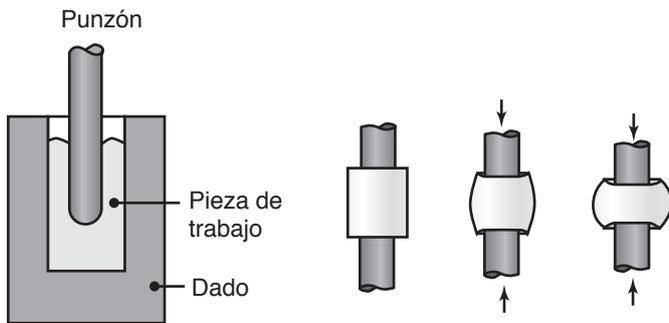


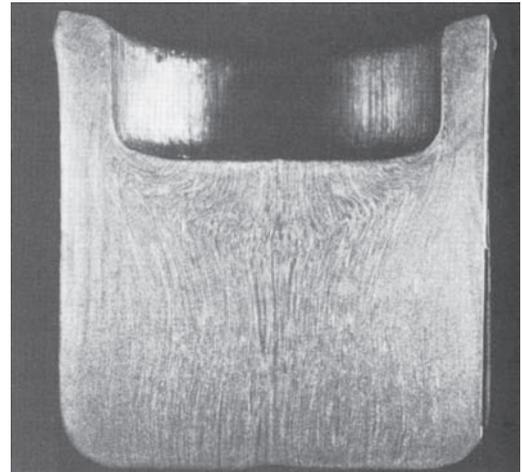
FIGURA 14.12 (a) Operación de cabeceado para formar cabezas en sujetadores, como clavos y remaches. (b) Secuencia de operaciones en la producción de una cabeza de perno típica mediante cabeceado.

muy alta. Esta relación suele estar limitada a menos de 3:1, pero con los dados apropiados puede ser mayor; por ejemplo, se pueden aceptar relaciones más altas si el diámetro de la cavidad del dado no es más de 1.5 veces el diámetro de la barra.

Las operaciones de cabeceado se realizan en máquinas llamadas **cabeceadoras**, que por lo general están altamente automatizadas, con tasas de producción de cientos de piezas pequeñas por minuto. El cabeceado en caliente sobre piezas más grandes suele realizarse en **recalcadores horizontales**. Las operaciones de cabeceado pueden combinarse con procesos de extrusión en frío para fabricar diversas piezas, como se describe en la sección 15.4.



(a)



(b)

FIGURA 14.13 (a) Ejemplos de operaciones de penetrado. (b) Palanquilla redonda penetrada que muestra un patrón de flujo de grano (vea también la figura 14.2c). Fuente: Cortesía de Ladish Co., Inc.

Penetrado. Éste es un proceso de indentación (muesca) (sin atravesar) de la superficie de una pieza de trabajo con un punzón, tiene el propósito de producir una cavidad o una impresión (figura 14.13). La pieza de trabajo puede estar confinada en un contenedor, tal como una cavidad del dado, o no estar restringida. El grado de deformación superficial de la pieza de trabajo depende de cuánto esté limitado su flujo libre a medida que desciende el punzón. Un ejemplo común del penetrado es la indentación de la cavidad hexagonal en las cabezas de los pernos. El penetrado puede estar seguido por el punzonado para producir un agujero en la pieza. (Para observar una representación de este proceso, vea la pepita que aparece encima del punzón estático en la parte central de la figura 14.9). El penetrado también se realiza para producir regiones huecas en los forjados utilizando equipos auxiliares que actúan lateralmente.

La *fuerza de penetrado* depende de (a) el área de la sección transversal y la geometría de la punta del punzón, (b) la resistencia de la pieza de trabajo y (c) la fricción en las interfaces del punzón con la pieza de trabajo. La presión puede variar de tres a cinco veces la resistencia del material, que es aproximadamente el mismo nivel de esfuerzo requerido para hacer una indentación en un ensayo de dureza (sección 2.6).

CASO DE ESTUDIO 14.1 Manufactura de un pasador escalonado mediante las operaciones de cabeceado y penetrado

La figura 14.14a muestra un pasador escalonado hecho de acero SAE 1008 y usado como parte de un ensamble de rodillos para ajustar la posición de un asiento de automóvil. La pieza es bastante compleja y debe fabricarse de manera progresiva con el fin de producir los detalles requeridos y llenar completamente el molde.

Los pasos del forjado en frío que se utilizan para producir esta pieza se muestran en la figura 14.14b. Primero, se extrude una pieza en bruto sólida y cilín-

drica (capítulo 15) en dos operaciones, seguidas del recalcado. La operación de recalcado utiliza una sección transversal cónica en el dado para producir la preforma y se orienta de tal manera que el material se concentra en la parte superior de la pieza con el fin de asegurar que se llene el dado. Después del formado con dado impresor, se lleva a cabo una operación de penetrado que forma el orificio.

(continúa)



FIGURA 14.14 (a) Pasador escalonado utilizado en el caso de estudio 14.1. (b) Ilustración de los pasos de manufactura utilizados para producir el pasador escalonado. Fuente: Cortesía de National Machinery, LLC.

Punzonado de cavidades para matrices (también conocido como clavado en numerosos talleres de forja). Este proceso consiste en presionar un punzón endurecido, con una geometría de punta particular, en la superficie de un bloque de metal. La cavidad producida se utiliza posteriormente como un dado para operaciones de formado, como las empleadas en la fabricación de artículos de mesa. Por lo general, la cavidad del dado es poco profunda, pero para obtener cavidades más profundas, primero se puede quitar un poco de material de la superficie del bloque por maquinado antes del punzonado de cavidades para matrices (vea las figuras 24.2c y d). La *fuerza del punzonado* de cavidades para matrices puede estimarse a partir de la ecuación

$$\text{Fuerza del punzonado de cavidades} = 3(\text{UTS})(A), \quad (14.4)$$

donde UTS se obtiene a partir de la tabla 2.2 y A es el área proyectada de la impresión. Por ejemplo, para el acero de alta resistencia con $\text{UTS} = 1500 \text{ MPa}$ y una pieza con un área proyectada de 400 mm^2 , la fuerza del punzonado de cavidades es $(3)(1500 \text{ N/mm}^2)(400 \text{ mm}^2) = 1.8 \text{ MN} = 179 \text{ toneladas}$.

Forjado orbital. En este proceso, el dado superior se mueve a lo largo de una trayectoria orbital y forma la pieza de manera *incremental*, una operación que es similar a la acción de un mortero y su pistilo y se utiliza para triturar hierbas y semillas. Los componentes típicos que pueden forjarse mediante este proceso son piezas en forma de disco y cónicas, como engranes cónicos y piezas en bruto (tejos) para engranes. La fuerza del forjado es relativamente pequeña porque, en cualquier instante particular, el contacto del dado se concentra en un área pequeña de la pieza de trabajo (vea también el *forjado incremental* que se presenta a continuación). La operación es relativamente tranquila y las piezas pueden formarse en el rango de 10 a 20 ciclos del dado en órbita.

Forjado incremental. En este proceso, una herramienta forja una pieza bruta en una forma particular mediante varios pasos pequeños. La operación es algo similar al desbaste (figura 14.4a), en el que el dado deforma la pieza bruta en un grado diferente en las diferentes posiciones. Debido a la menor área de contacto con el dado, el proceso requiere fuerzas mucho menores de las que necesita el forjado con dado impresor convencional; asimismo, las herramientas son más simples y menos costosas.

Forjado isotérmico. También conocido como **forjado en dado caliente**, en este proceso los dados se calientan a una temperatura muy similar a la de la pieza de trabajo (vea también la tabla 14.3). Debido a que la pieza de trabajo permanece caliente (en esencia, no se pierde calor hacia los dados), mantiene su fuerza de flujo y su alta ductilidad durante

el forjado, por lo que la carga de la forja es baja y se mejora el flujo del material dentro de la cavidad del dado. Las piezas complicadas pueden forjarse isotérmicamente con buena precisión dimensional y una forma casi neta mediante una sola carrera en una prensa hidráulica. Por lo general, los dados para el forjado en caliente están hechos de aleaciones de níquel o de molibdeno (debido a su resistencia a las altas temperaturas), pero se pueden utilizar dados de acero para las aleaciones de aluminio.

El proceso es caro y la tasa de producción es baja. Sin embargo, puede resultar económico para piezas forjadas especializadas y de forma intrincada, hechas a partir de materiales como aluminio, titanio y superaleaciones, siempre que la cantidad de piezas forjadas que se fabriquen sea lo suficientemente alta como para justificar los altos costos del dado.

Forjado rotativo. En este proceso, también conocido como *forjado radial*, *recalcado rotativo*, o simplemente *emboquillar*, una barra sólida o un tubo se somete a fuerzas de impacto radiales utilizando un conjunto de dados con movimiento alternado (figuras 14.15a y b). Los dados se activan por medio de un conjunto de rodillos colocados dentro de una caja, en una acción similar a la de un cojinete de rodillos. La pieza de trabajo se encuentra estática y los dados giran (mientras se mueven radialmente en sus ranuras), golpeando la pieza de trabajo a tasas de hasta 20 golpes por segundo. En las **máquinas de forjado en dado cerrado**, los movimientos de los dados se deben al movimiento alternado de cuñas (figura 14.15c). Los dados pueden abrirse de manera más amplia que los de las forjadoras rotativas, ajustándose a piezas de gran diámetro o de diámetro variable. En otro tipo de máquina, los dados no giran sino que se mueven radialmente hacia dentro y hacia fuera. Los productos típicos elaborados con esta máquina son **puntas de desarmador** y de soldadura de hierro.

Este tipo de forjado también se puede utilizar para *ensamblar* accesorios a través de cables y alambre; en tales casos, el accesorio tubular se forja directamente sobre el cable. El proceso también se utiliza para operaciones como el punteado (afilado de la punta de una pieza cilíndrica) y el *dimensionamiento* (acabado hasta lograr las dimensiones específicas de una pieza).

Por lo general, el forjado rotativo se limita a un diámetro máximo de la pieza de trabajo de alrededor de 150 mm (6 pulg) y a piezas tan pequeñas como de 0.5 mm (0.02 pulg); las tolerancias dimensionales se encuentran en el rango de ± 0.05 a ± 0.5 mm (de 0.002 a 0.02 pulg). El proceso es adecuado para tasas de producción medianas y altas con valores posibles de hasta 50 piezas por minuto, dependiendo de la complejidad de la pieza. El forjado rotativo es un proceso versátil y está limitado en cuanto a la longitud sólo por el largo de la barra que soporta al mandril, si es que resulta necesaria (vea la figura 14.15b).

Extrusión (o recalcado) de tubo. En este proceso, el diámetro interior y/o el grosor de un tubo se reducen con o sin el uso de *mandriles internos* (figuras 14.16a y b). Para los tubos de diámetro pequeño, puede utilizarse alambre de alta resistencia como mandril. Los mandriles también pueden hacerse con ranuras longitudinales, para permitir el forjado de tubos conformados internamente (figura 14.16c). Por ejemplo, el *estriado* en los cañones de las armas (ranuras internas en espiral para dar un efecto giroscópico a las balas) puede producirse mediante la extrusión de tubos sobre un mandril con ranuras en espiral. Existe maquinaria especial que puede extrudir cañones y otras piezas tubulares con diámetros de inicio tan grandes como 350 mm (14 pulg).

TABLA 14.3

Forjabilidad de los metales, en orden decreciente (vea también la tabla 15.1)

Metal o aleación	Rango aproximado de temperaturas (°C) para forjado en caliente
Aleaciones de aluminio	400-550
Aleaciones de magnesio	250-350
Aleaciones de cobre	600-900
Aceros al carbono y de baja aleación	850-1150
Aceros inoxidables martensíticos	1100-1250
Aceros inoxidables austeníticos	1100-1250
Aleaciones de titanio	700-950
Superaleaciones base hierro	1050-1180
Superaleaciones base cobalto	1180-1250
Aleaciones de tantalio	1050-1350
Aleaciones de molibdeno	1150-1350
Superaleaciones base níquel	1050-1200
Aleaciones de tungsteno	1200-1300

14.5 Forjabilidad de los metales; defectos de forjado

La *forjabilidad* suele definirse como la capacidad que tiene un material de experimentar una deformación por forjado sin agrietarse. Se han desarrollado diversas pruebas para cuantificar la forjabilidad; sin embargo, debido a su naturaleza compleja, sólo hay dos pruebas sencillas que cuentan con aceptación general: la compresión y la torsión en caliente.

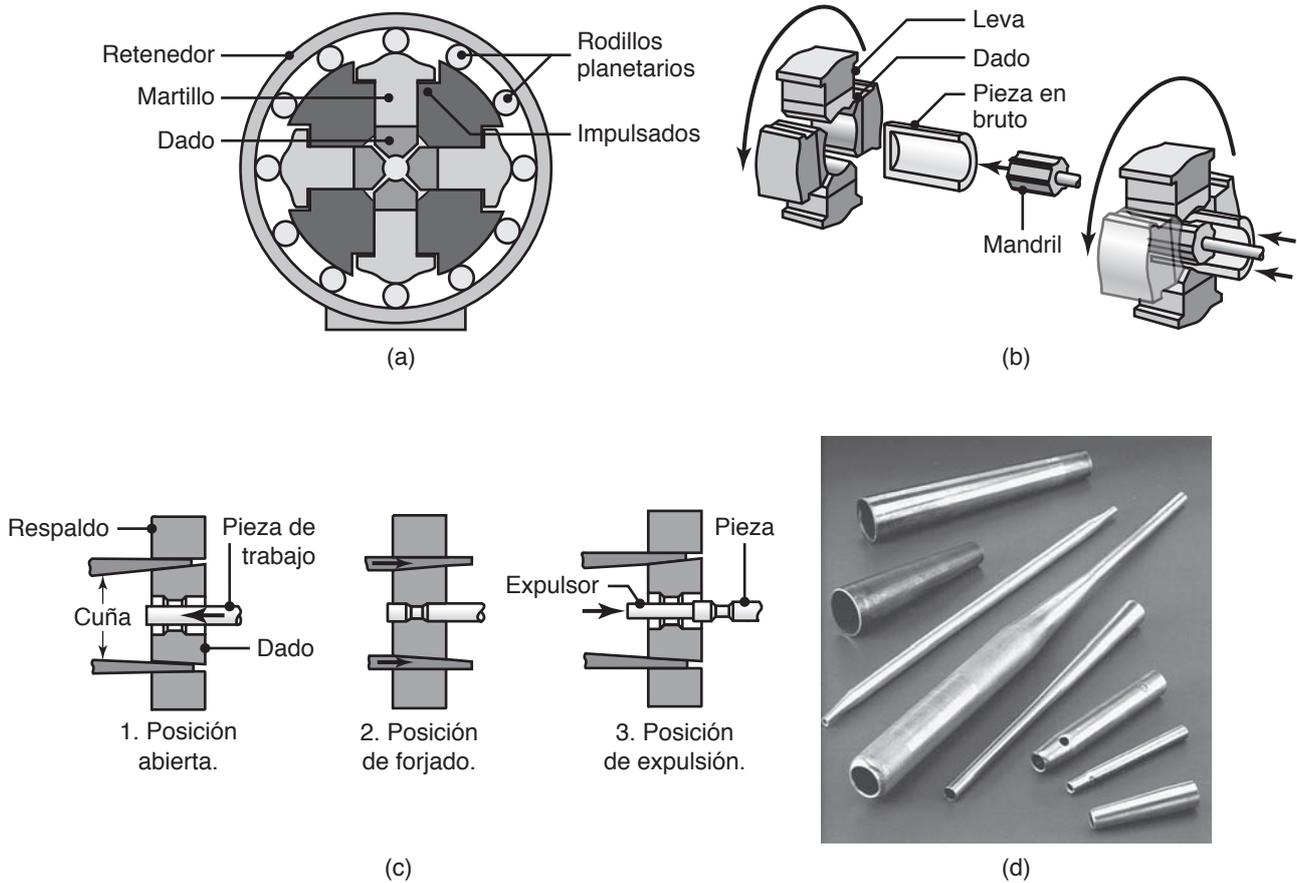


FIGURA 14.15 (a) Ilustración esquemática del proceso de forjado rotativo. (b) Formación de los perfiles internos en una pieza tubular por forjado rotativo. (c) Máquina de forjado rotativo en dado cerrado que muestra la formación de un eje escalonado. (d) Piezas típicas hechas por forjado rotativo. Fuente: (d) Cortesía de J. Richard Industries.

En la **prueba de compresión**, una muestra sólida, cilíndrica, se comprime entre dados planos y se mide la reducción de la altura a la que comienzan a desarrollarse grietas en las superficies abarriladas (vea también la figura 2.20d); cuanto mayor sea la deformación antes de la formación de grietas, mayor será la forjabilidad del metal. El segundo método es la **prueba de torsión en caliente**, en la cual una muestra redonda se tuerce en forma continua y en la misma dirección hasta que falla. Esta prueba se lleva a cabo en cierta cantidad de muestras y a diferentes temperaturas; después se representa gráficamente el número de vueltas completas a las que se somete cada muestra antes de la falla a cada temperatura. La temperatura a la que se produce el máximo número de vueltas se convierte en la temperatura de forjado para la máxima forjabilidad. Se ha encontrado que esta prueba es particularmente útil para los aceros.

En la tabla 14.3 se proporciona la forjabilidad de diversos metales y aleaciones en orden decreciente. De manera más amplia, la forjabilidad se califica sobre consideraciones como (a) la ductilidad y resistencia del material, (b) la temperatura de forjado requerida, (c) el comportamiento friccional entre el dado y la pieza de trabajo y (d) la calidad de las piezas forjadas que se producen. Las clasificaciones deben considerarse sólo como una guía general. La tabla 14.3 incluye los rangos de *temperatura de forjado en caliente* típicos para diferentes metales y aleaciones; para el forjado *en tibio*, las temperaturas oscilan entre 200 y 300 °C (400 y 600 °F) para aleaciones de aluminio, y entre 550 y 750 °C (1000 y 1400 °F) para los aceros.

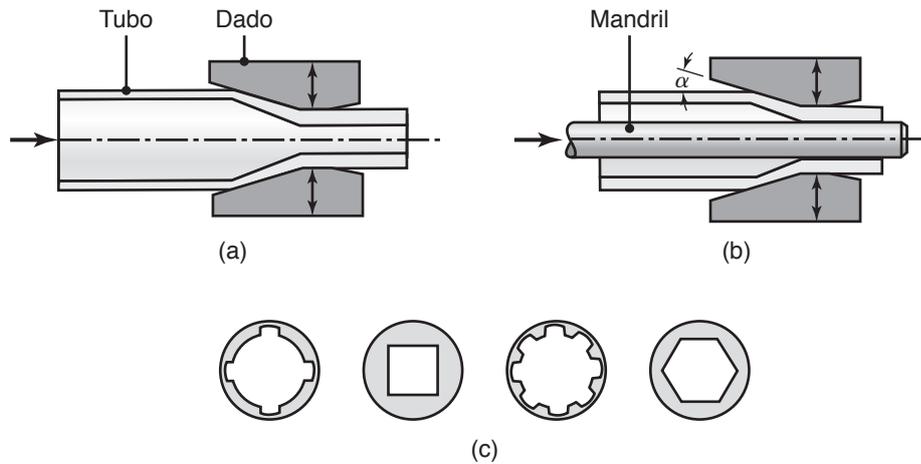


FIGURA 14.16 (a) Extrusión o recalado de tubos sin un mandril; observe el aumento del grosor de la pared en el espacio entre dados. (b) Extrusión de tubos con un mandril; note que el grosor final de la pared del tubo depende del diámetro del mandril. (c) Ejemplos de secciones transversales de tubos producidos por extrusión con mandriles conformados; mediante este proceso se puede realizar el estriado (ranuras internas en espiral) de pequeños cañones de arma.

Defectos de forjado. Además del agrietamiento de la superficie, existen otros defectos que pueden desarrollarse durante el forjado a consecuencia del patrón de flujo de los materiales contenidos en el dado, como se describe a continuación en la sección 14.6 en relación con el diseño de dados. Por ejemplo, si hay un volumen suficiente de material para llenar completamente la cavidad del dado, el alma puede pandearse durante la forja y desarrollar pliegues (figura 14.17a). Por el contrario, si el alma es demasiado gruesa, el exceso de material fluirá más allá de las piezas forjadas que ya están formadas y se desarrollarán grietas internas (figura 14.17b).

Los diversos radios presentes en la cavidad del dado de forjado pueden influir significativamente en la formación de estos defectos. También es posible que se desarrollen defectos internos debido a (a) la deformación no uniforme del material en la cavidad del dado, (b) los gradientes de temperatura desarrollados a lo largo de la pieza de trabajo durante el forjado y (c) los cambios microestructurales causados por las transformaciones de fase. El *patrón de flujo del grano* del material también es importante en el forjado. Las líneas de flujo pueden llegar a una superficie en forma perpendicular, como se muestra en la figura 14.13b, lo cual se conoce como **granos en el extremo**; los límites de grano quedan directamente expuestos al medio ambiente y pueden ser atacados por éste, desarrollando una superficie rugosa y actuando como elevadores del esfuerzo.

Los defectos de forjado pueden causar fallas por fatiga, corrosión y desgaste durante la vida útil de la pieza forjada. La importancia de la inspección de las piezas forjadas antes de su puesta en servicio, en particular en aplicaciones críticas, resulta obvia. Las técnicas de inspección de las piezas fabricadas se describen en el capítulo 36.

14.6 Diseño de dados, materiales para dados y lubricación

El diseño de dados de forjado requiere consideraciones de (a) la forma y complejidad de la pieza de trabajo, (b) su forjabilidad, (c) su resistencia y sensibilidad a la velocidad de deformación, (d) temperatura, (e) las características friccionales en las interfases de la pieza de trabajo con el dado y (f) la distorsión bajo las cargas de forjado. La regla

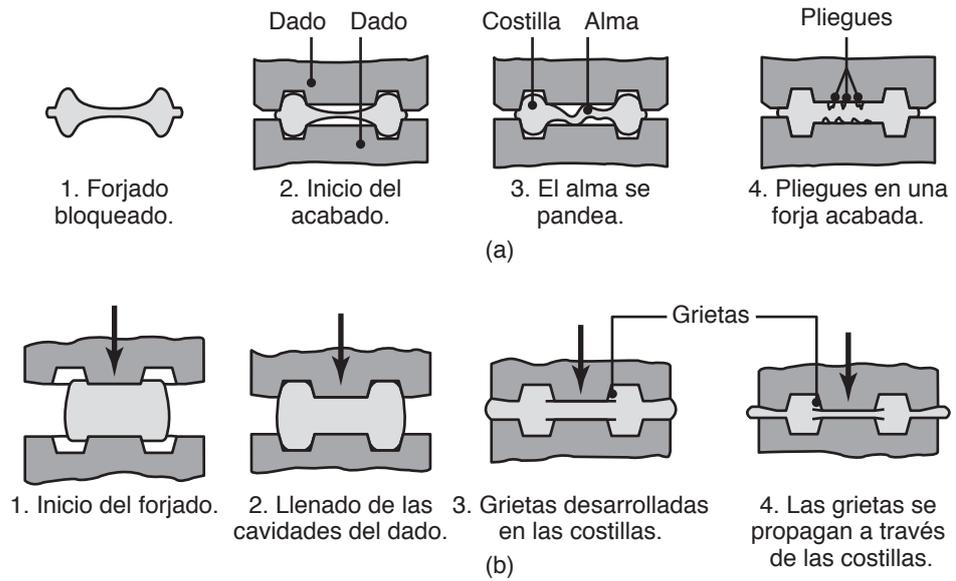


FIGURA 14.17 Ejemplos de defectos en piezas forjadas. (a) Pliegues debidos al pandeo del alma durante el forjado; para evitar este problema, se debe incrementar el grosor del alma. (b) Defectos internos causados por una palanquilla de gran tamaño; las cavidades del dado se llenan prematuramente y en el centro el material fluye más allá de las regiones llenas cuando el dado se cierra.

más importante en el diseño de matrices o dados es el hecho de que la pieza fluirá en la dirección de menor resistencia. Deben considerarse *formas intermedias* de las piezas de trabajo de modo que las cavidades del dado se llenen correctamente y sin defectos; en la figura 14.8a se presenta un ejemplo de las formas intermedias para una biela.

Con los continuos avances en la simulación confiable de todo tipo de operaciones metalúrgicas, existe software disponible para ayudar a predecir el flujo de materiales en las cavidades del dado de forjado (vea la figura 14.18). La simulación incorpora diversas condiciones, como la temperatura de la pieza de trabajo y la transferencia de calor hacia los dados, las condiciones de fricción en las superficies de contacto del dado con la pieza de trabajo y la velocidad de forjado. Este tipo de software se ha vuelto esencial en el diseño de dados, especialmente para eliminar el forjado de piezas defectuosas (vea también la sección 38.7).

Preformado. Los requisitos para preformar una pieza de trabajo son los siguientes: (a) el material no debe fluir fácilmente hacia el área de rebaba, de lo contrario el llenado del dado quedará incompleto, (b) el patrón de flujo del grano debe ser favorable para la resistencia y la confiabilidad de los productos y (c) el deslizamiento en la interfase del dado con la pieza de trabajo debe minimizarse con el fin de reducir el desgaste del dado. La selección de preformas involucra calcular las áreas de sección transversal en cada ubicación de la pieza forjada; en estos cálculos, son muy útiles el modelado y las técnicas de simulación por computadora.

Características de un dado. La terminología para los dados de forjado se muestra en la figura 14.6e. En la mayoría de las piezas forjadas, la **línea de partición** se encuentra en la sección transversal más grande de la pieza. Para las formas simétricas simples, la línea de partición está generalmente en un solo plano y en el centro de la pieza forjada; en formas de mayor complejidad, la línea no puede estar en un solo plano. Así, los dados se diseñan de tal modo que hagan buen contacto con la pieza de trabajo, evitando las fuerzas de empuje laterales al mismo tiempo que mantienen la alineación del dado durante el forjado.

Después de restringir suficientemente el flujo lateral para asegurar que el dado se llene, el material de rebaba se deja fluir en un **canal de desahogo de rebaba**, de modo que la rebaba adicional no aumente la carga de forjado excesivamente. Un lineamiento general para el grosor del cordón de rebaba es 3% del espesor máximo (dimensión vertical) de la pieza forjada. La longitud del cordón de rebaba suele ser de dos a cinco veces el grosor de la rebaba.

Los **ángulos de salida** son necesarios en casi todos los dados de forjado con el fin de facilitar el retiro de la pieza forjada. Después del enfriamiento, la pieza forjada se reduce tanto radial como longitudinalmente; por lo tanto, los ángulos de salida internos (entre 7 y 10°) se hacen más grandes que los externos (entre 3 y 5°).

La selección de los radios adecuados para las esquinas y los filetes es importante para asegurar el flujo continuo del metal en la cavidad del dado y mejorar la vida del dado. Por lo general, no se recomiendan radios pequeños debido a su efecto adverso en el flujo del metal y a su tendencia a gastarse rápidamente (como resultado de la concentración de esfuerzos y los ciclos térmicos). Los radios de filete pequeños también pueden causar agrietamiento por fatiga en los dados. Como regla general, estos radios deben ser tan grandes como lo permita el diseño de la pieza forjada. Tal como sucede con los modelos usados en la fundición (sección 12.2.1), en el diseño de dados de forjado se proporcionan *tolerancias* cuando es necesario para impartir las dimensiones finales deseadas y el acabado superficial por maquinado o rectificado de la pieza forjada. Es necesario proporcionar tolerancias de maquinado en las bridas, los orificios y las superficies de contacto.

Materiales para dados. Los requisitos generales para elegir los materiales de fabricación de los dados son:

- Resistencia y tenacidad, especialmente a temperaturas elevadas.
- Templabilidad y capacidad para endurecerse uniformemente.
- Resistencia al choque térmico y mecánico.
- Resistencia al desgaste, particularmente resistencia al desgaste abrasivo, debido a la presencia de incrustaciones en el forjado en caliente.

Los materiales más comunes usados para fabricar dados son los aceros para herramientas y dados que contienen cromo, níquel, molibdeno y vanadio (vea las tablas 5.7 a 5.9). Los dados se hacen a partir de bloques, que a su vez se forjan a partir de fundiciones, y luego se mecanizan y terminan con la forma requerida y el acabado superficial deseado.

Lubricación. Existe una amplia variedad de fluidos metalúrgicos disponibles para su uso en el forjado, como se describe en la sección 33.7. Los lubricantes influyen en gran medida sobre la fricción y el desgaste; a su vez, afectan las fuerzas requeridas [vea la ecuación (14.1)], la vida del dado y la manera en que el material fluye dentro de las cavidades del dado. Los lubricantes también pueden actuar como una *barrera térmica* entre la pieza de trabajo caliente y los dados relativamente fríos, lo cual ralentiza la velocidad de enfriamiento de la pieza de trabajo y mejora el flujo del metal. Otra función importante del lubricante es la de actuar como un *agente de separación*, evitando que la pieza forjada se pegue a los dados y ayudando a liberarla de éstos.

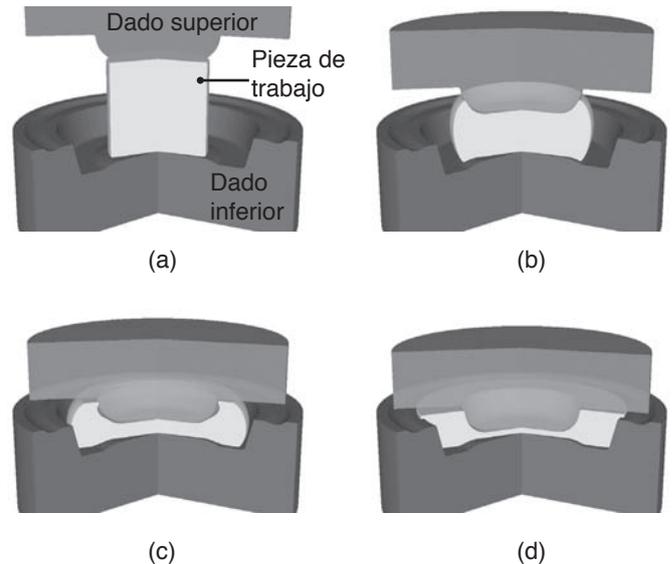


FIGURA 14.18 Deformación de una pieza en bruto durante el forjado según lo previsto por el programa de software DEFORM basado en el método de análisis del elemento finito. Fuente: Cortesía de Scientific Forming Technologies Corporation.

14.7 Métodos para la fabricación de dados y fallas en los dados

Los dados tienen un impacto importante en la economía general del forjado debido a su costo significativo y el tiempo necesario para producirlos, ya que la fabricación de algunos de ellos puede tardar incluso meses. También es importante el mantenimiento de los dados y sus modificaciones cuando las partes se producen y evalúan por primera vez.

Existen diversos métodos de manufactura que pueden usarse, ya sea individualmente o en combinación, para fabricar dados de forjado. Estos métodos incluyen la fundición, el forjado, maquinado, rectificado, métodos eléctricos y electroquímicos [particularmente el maquinado por descarga eléctrica (EDM, por sus siglas en inglés) o electroerosión de electrodo o de hilo] y el haz láser para la fabricación de dados pequeños. Una tendencia importante y continua es la producción de herramientas y dados mediante la fabricación rápida de herramientas utilizando técnicas de **prototipado rápido**, las cuales se describen en la sección 20.6.

La producción de una cavidad en un bloque de dado se denomina **hundimiento del dado**. Recuerde que también puede usarse el proceso de **punzonado de cavidades** (sección 14.4), ya sea en frío o en caliente, para hacer dados pequeños con cavidades poco profundas. Por lo general, los dados se tratan térmicamente después de su fabricación para obtener mayor dureza y resistencia al desgaste (capítulo 33). Si es necesario, el perfil y el acabado superficiales se mejoran aún más mediante rectificado y pulido; por lo general, con el uso de máquinas de control numérico.

La elección de un método de manufactura para los dados depende del tamaño y de la forma del dado, además de la operación particular en la que se utilizará el dado; por ejemplo, fundición, forjado, extrusión, metalurgia de polvos o moldeo de plásticos. Igual que en todas las operaciones de manufactura, el costo suele determinar el proceso seleccionado porque los costos de las herramientas y de los dados pueden ser significativos en las operaciones de fabricación. Es posible fundir dados de varios tamaños y formas a partir de aceros, hierros colados y aleaciones no ferrosas; los procesos utilizados para su preparación pueden variar desde la fundición en arena (para grandes dados con peso de varias toneladas) hasta el moldeo en cáscara (para fundir dados pequeños). Por lo general, se prefieren los aceros fundidos para los dados grandes debido a su resistencia y tenacidad, así como por la facilidad con que la composición, el tamaño de grano y otras propiedades del acero pueden ser controladas y modificadas.

Comúnmente, los dados se *maquinan* a partir de bloques forjados utilizando procesos como el fresado de alta velocidad, torneado, rectificado y maquinado por electroerosión y electroquímico (vea la parte IV). Esta operación se muestra en la figura I.10b para hacer moldes para armazones de gafas. En materiales para dados de alta resistencia y resistentes al desgaste que son duros o están tratados térmicamente (y por lo tanto son difíciles de maquinar), se usan a menudo procesos como el maquinado duro y la electroerosión y el maquinado electroquímico.

Por lo general, un dado se maquina mediante fresado en máquinas herramientas controladas por computadora, utilizando diversos paquetes de software que tienen la capacidad de optimizar la trayectoria de la herramienta de corte; así, por ejemplo, se puede obtener el mejor acabado superficial en el menor tiempo de maquinado posible. La configuración para el maquinado también es importante puesto que los dados deben maquinarse tanto como sea posible en una sola posición, sin tener que extraerlos de sus sujeciones ni reorientarlos para operaciones de maquinado posteriores.

Después del tratamiento térmico, para conseguir las propiedades mecánicas deseadas, los dados suelen someterse a *operaciones de acabado* (sección 26.7) tales como rectificado, pulido y procesos químicos y eléctricos con el fin de obtener el acabado superficial deseado y la precisión dimensional requerida. Esto puede incluir también *tratamientos superficiales con láser* y *recubrimientos* (capítulo 34) para mejorar la vida del dado. Los rayos láser también pueden utilizarse para reparar y reconfigurar el dado en las regiones donde se encuentre desgastado (vea también la figura 33.11).

Costos de los dados. A partir del análisis anterior, resulta evidente que el costo de un dado depende en gran medida de su tamaño, de la complejidad de su forma y del acabado superficial requerido, así como del material y la manufactura, el tratamiento térmico y los métodos de acabado empleados. A lo largo de este libro, por ejemplo en la tabla 12.6, se dan algunos rangos cualitativos de los costos de los herramientas y dados. La fabricación

de dados pequeños y relativamente simples puede costar incluso cientos de dólares estadounidenses y el costo aproximado de un juego de dados para paneles de carrocería de automóvil puede ser de hasta \$2 millones. Por otro lado, debido a que comúnmente se hace un gran número de piezas a partir de un juego de dados, el *costo del dado por pieza fabricada* suele ser una pequeña parte de los costos de fabricación por pieza (vea también la sección 40.9). El *tiempo de espera* requerido para producir los dados también puede tener un impacto significativo en el costo general de manufactura de las piezas fabricadas.

Fallas en los dados. Por lo general, las fallas son el resultado de una o más de las siguientes causas:

- Diseño incorrecto del dado.
- Selección inadecuada del material del dado.
- Operaciones de manufactura, tratamiento térmico y acabado inadecuadas.
- Sobrecalentamiento y agrietamiento por calor (grietas causadas por los ciclos de temperatura).
- Desgaste excesivo del dado.
- Sobrecarga (fuerza excesiva sobre el dado).
- Alineación incorrecta de los componentes o segmentos del dado.
- Mal uso.
- Manejo inadecuado del dado.

Otras consideraciones. Con el fin de soportar las fuerzas involucradas, un dado debe tener secciones transversales y espacios suficientemente grandes (para evitar atascos). Cambios abruptos en la sección transversal, esquinas agudas, radios, filetes y un acabado superficial grueso (incluyendo las marcas del rectificado y su orientación sobre la superficie del dado) actúan como elevadores del esfuerzo y, por lo tanto, reducen la vida del dado. Para mejorar la resistencia y reducir la tendencia al agrietamiento, los dados pueden hacerse en segmentos y ensamblarse en un dado completo con anillos de pretensión. El manejo, la instalación, el ensamble y la alineación adecuados de los dados son esenciales. La sobrecarga de las herramientas y los dados puede causar fallas prematuras. Una causa común del daño en los dados es la falla del operador, o de un robot programable, al no retirar la pieza formada del dado antes de colocar (cargar) otra pieza bruta en éste.

14.8 Máquinas de forjado

Existen diversos tipos de máquinas de forjado disponibles y con una amplia gama de capacidades (tonelaje), velocidades y características de rapidez de carrera (figura 14.19 y tabla 14.4).

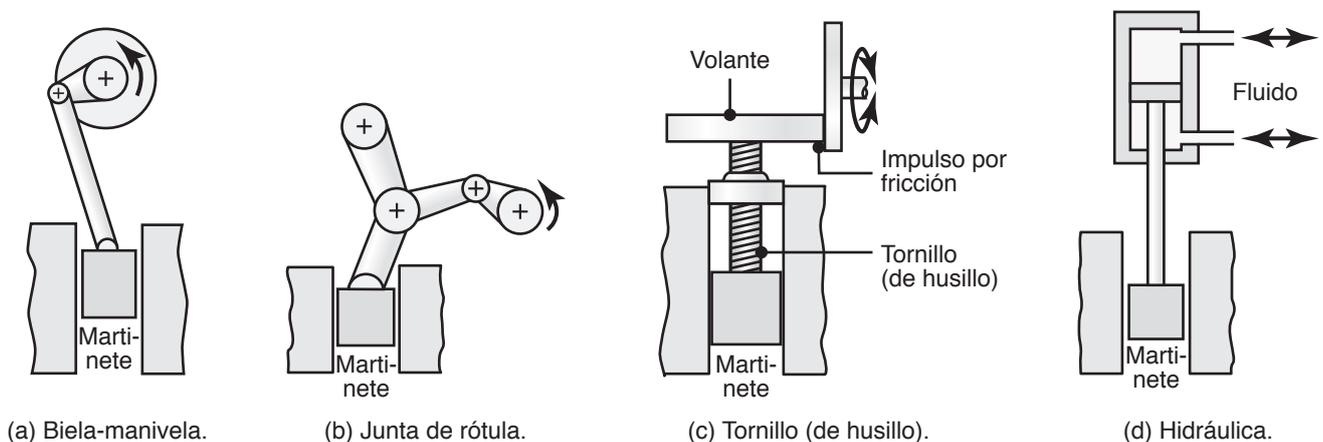


FIGURA 14.19 Ilustración esquemática de los principios de diversas máquinas de forjado. (a) Prensa de biela-manivela con impulso excéntrico; el eje excéntrico puede sustituirse por un cigüeñal para aplicar un movimiento alternado hacia arriba y hacia abajo sobre el martinete. (b) Prensa de rótula. (c) Prensa de tornillo (husillo). (d) Prensa hidráulica.

TABLA 14.4

Rangos de velocidad típicos del equipo de forjado	
Equipo	m/s
Prensa hidráulica	0.06-0.30
Prensa mecánica	0.06-1.5
Prensa de tornillo (husillo)	0.6-1.2
Martillo de caída	3.6-4.8
Martillo de caída impulsado	3.0-9.0
Martillo de contragolpe	4.5-9.0

Prensas mecánicas. Básicamente, estas prensas son cualesquiera del tipo *biela-manivela* o *excéntrico* (figura 14.19a). La velocidad varía desde un máximo en el centro de la carrera hasta cero en la parte inferior de la carrera; por lo tanto, las prensas mecánicas son de *carrera limitada*. En una prensa mecánica, la energía es generada por un gran volante accionado por un motor eléctrico. El embrague acopla el volante con un eje excéntrico; después, una biela convierte el movimiento rotatorio en un movimiento lineal alternado. En la figura 14.19b se muestra una prensa mecánica *de rótula*; debido al diseño del eslabonamiento, en este tipo de prensa es posible aplicar fuerzas muy altas (vea también la figura 11.21).

La fuerza disponible en una prensa mecánica depende de la posición de la carrera y se vuelve extremadamente alta al final de la carrera, por lo que una configuración adecuada resulta esencial para evitar la ruptura de los componentes del dado o del equipo. Las prensas mecánicas tienen altas tasas de producción, son más fáciles de automatizar y requieren menos habilidad del operador que otros tipos de máquinas. Las capacidades de la prensa suelen oscilar entre 2.7 y 107 MN (300 y 12 000 tons). Las prensas mecánicas son recomendables para forjar piezas que requieren alta precisión.

Prensas de tornillo. Conocidas también como prensas de husillo, estas prensas (figura 14.19c) obtienen su energía a partir de un volante de inercia, por lo que se consideran de *energía limitada*. La carga de forjado se transmite a través de un tornillo vertical, grande, y el martinete se detiene al disiparse la energía del volante. Si los dados no se cierran al final del ciclo, la operación se repite hasta completar el forjado. Las prensas de tornillo se utilizan para diversas operaciones de forjado en dado abierto y cerrado. Son particularmente adecuadas para pequeñas cantidades de producción y para piezas delgadas con alta precisión, como los álabes de turbina. Las capacidades de la prensa oscilan desde 1.4 hasta 280 MN (160 a 31 500 tons).

Prensas hidráulicas. Estas prensas (figura 14.19d) funcionan a velocidades constantes y son de *carga limitada* (carga restringida), donde la prensa se detiene si la carga requerida es superior a su capacidad. Es posible transmitir grandes cantidades de energía desde la prensa a la pieza de trabajo mediante una carga constante en toda la carrera, cuya velocidad se puede controlar. Debido a que el forjado en una prensa hidráulica requiere más tiempo que en los otros tipos de máquinas de forjado, los cuales se describen a continuación, la pieza de trabajo puede enfriarse rápidamente a menos que se calienten los dados (vea el *forjado isotérmico*, sección 14.4). En comparación con las prensas mecánicas, las prensas hidráulicas son más lentas e implican altos costos iniciales, pero requieren menos mantenimiento.

Por lo general, una prensa hidráulica consiste en un marco con dos o cuatro columnas, pistones, cilindros, martinetes y bombas hidráulicas impulsadas por motores eléctricos. La velocidad del martinete puede variarse durante la carrera. Las capacidades de prensa llegan hasta 125 MN (14 000 tons) para el forjado en dado abierto y hasta 730 MN (82 000 tons) para el forjado en dado cerrado. El soporte principal del tren de aterrizaje del avión Boeing 747 se forja en una prensa hidráulica de 450 MN (50 000 tons); esta pieza está hecha con una aleación de titanio y pesa aproximadamente 1350 kg (3000 lb).

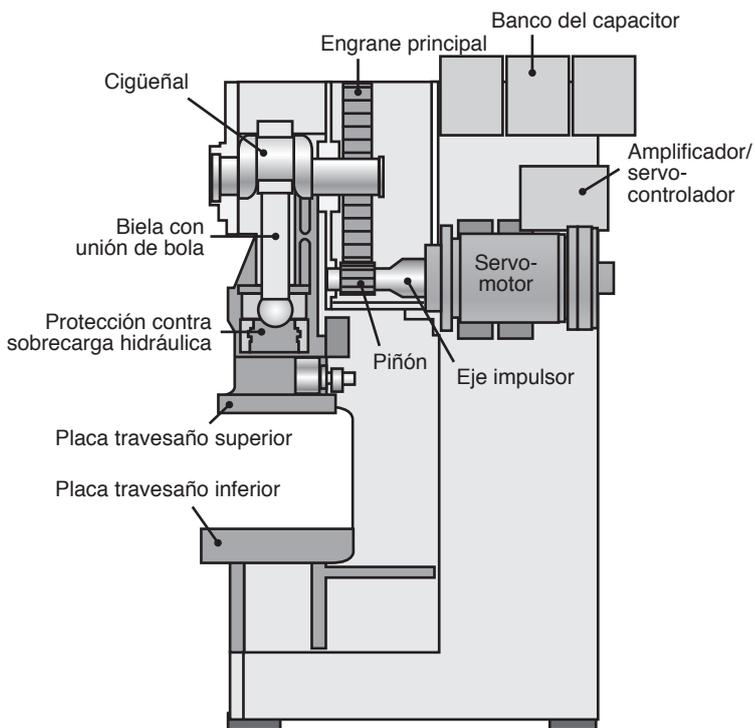
Martillos. Los martillos obtienen su energía a partir de la energía potencial del martinete, que se convierte en energía cinética; por lo tanto, son de *energía limitada*. A diferencia de las prensas hidráulicas, los martillos funcionan a altas velocidades, lo cual minimiza el enfriamiento de un forjado en caliente. Las velocidades de enfriamiento bajas permiten el forjado de formas complejas, en particular aquellas con cavidades finas y profundas. Para completar la forja, suelen darse varios golpes sucesivos en el mismo dado. Los martillos están disponibles en una variedad de diseños y representan el tipo de equipo para forjado más versátil y menos costoso.

Martillos de caída. En los *martillos de caída impulsados*, la carrera descendente del pistón se acelera por medio de vapor, aire o presión hidráulica. El rango de los pesos de los martillos va de 225 a 22 500 kg (500 a 50 000 lb) con capacidades de energía que alcanzan los 1150 kJ (850 000 pies/lb). En la operación de los *martillos de caída por gravedad*, proceso llamado **forjado por gravedad**, la energía se deriva del martinete en caída libre. La energía disponible es el producto del peso del martinete por la altura de su caída. Los pesos del martinete van de 180 a 4500 kg (400 a 10 000 lb) con capacidades de energía que llegan hasta 120 kJ (90 000 pies/lb).

Martillos de contragolpe. Estos martillos tienen dos martinetes que, simultáneamente, se acercan entre sí horizontal o verticalmente para forjar la pieza. Tal como sucede en las operaciones de forjado en dado abierto, la pieza de trabajo puede girarse entre golpe y golpe con el fin de conformar la pieza durante el forjado. Los martillos de contragolpe operan a altas velocidades y transmiten menos vibraciones a sus bases; sus capacidades llegan hasta 1200 kJ (900 000 pies/lb).

Máquinas de forjado de alta velocidad y alta energía. En estas máquinas, el martinete se acelera rápidamente, mediante gas inerte a alta presión, y la pieza se forja de un solo golpe a una velocidad muy alta. Aunque hay varios tipos de estas máquinas, diversos problemas asociados con su funcionamiento y mantenimiento, así como consideraciones acerca de la ruptura del dado y de seguridad, han limitado en gran medida su uso en la industria.

Servoprensas. Un desarrollo reciente es el uso de servoprensas para aplicaciones de forjado y estampado (figura 14.20). Estas prensas utilizan servomotores junto con meca-



(a)



(b)

FIGURA 14.20 (a) Ilustración esquemática de una servoprensa con la fuente de energía y los componentes de la transmisión resaltados. (b) Ejemplo de una servoprensa con unos 23 000 kN (2500 tons) de capacidad. Fuente: Cortesía de Aida Engineering, Inc.

nismos de eslabonamiento, como en las prensas mecánicas, de rótula o de tornillo (husillo). No hay embragues o frenos, en su lugar, el perfil de velocidad deseado se consigue a través de un controlador de servomotor. Así, el servomotor permite una gran flexibilidad con respecto a las velocidades y alturas de carrera, lo que simplifica la configuración y permite un perfil de velocidad optimizado para forjar materiales o productos difíciles; además, las servoprensas pueden producir piezas hasta con sólo 10% del consumo de energía requerido por otras prensas, lo cual es atribuible principalmente a sus bajos costos de energía cuando no está produciendo piezas (vea la sección 40.4). Las servoprensas pueden desarrollar fuerzas de hasta 25 000 kN (2800 tons); es posible desarrollar fuerzas más grandes mediante máquinas híbridas que combinan el servomotor con almacenamiento de energía en un volante inercial.



Código QR 14.5 La ventaja del forjado. (Fuente: Cortesía de la Forging Industry Association, www.forging.org).

14.9 Economía del forjado

Son diversos los factores involucrados en el costo de las piezas forjadas, dependiendo de la complejidad de la forja y de los costos del herramental y de los dados, que van de moderados a altos. Tal como en otras operaciones de manufactura, estos costos se reparten entre el número de piezas forjadas con un juego de dados en particular. Por lo tanto, con referencia a la figura 14.21, aunque el costo del material de la pieza a forjar es constante, los costos de preparación y herramental por pieza disminuyen a medida que aumenta el número de piezas forjadas.

La relación del costo del material del dado sobre el costo total del forjado de la pieza aumenta con el peso de las piezas forjadas: cuanto más caro sea el material, mayor será el costo del material en relación con el costo total. Debido a que los dados deben hacerse y las operaciones de forjado deben realizarse, independientemente del tamaño de la forja, el costo de los dados y de la operación de forjado con respecto al costo del material es alto para las piezas pequeñas; por el contrario, los costos del material del dado son relativamente bajos.

El tamaño de las piezas forjadas también tiene algún efecto en el costo. Los tamaños varían desde piezas forjadas pequeñas (como utensilios y pequeños componentes automotrices) hasta grandes (como engranajes, cigüeñales y bielas para grandes motores). A medida que el tamaño de la forja aumenta, la proporción de los costos de material en el costo total también lo hace, pero a un ritmo inferior. Esto se debe a que (a) el aumento

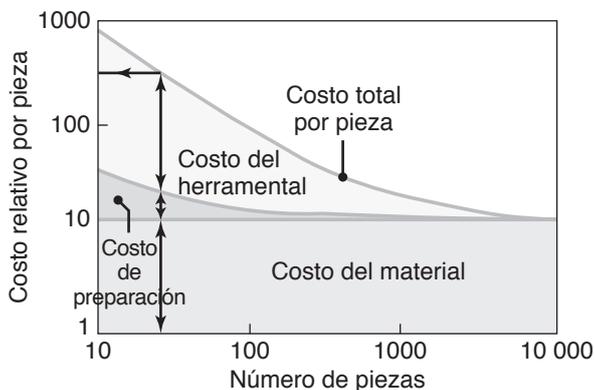


FIGURA 14.21 Costo típico por pieza (*costo unitario*) en el forjado; observe cómo los costos de preparación y del herramental por pieza disminuyen a medida que aumenta el número de piezas forjadas (si todas las piezas utilizan el mismo dado).

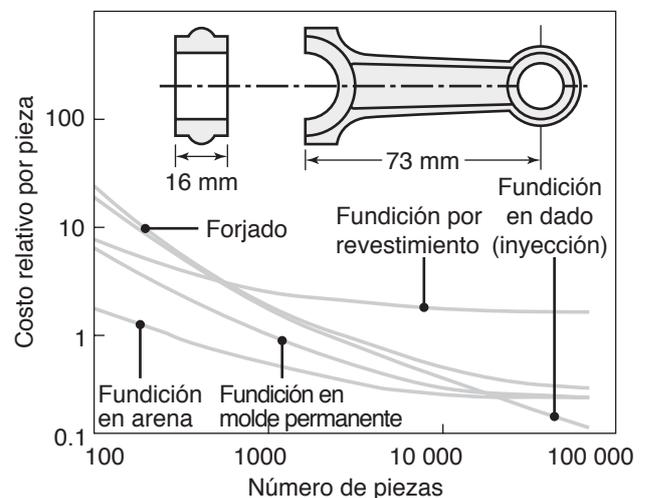


FIGURA 14.22 Costos relativos por pieza de una pequeña biela hecha mediante diversos procesos de forjado y fundición; observe que, para grandes cantidades, el forjado es más económico y que la fundición en arena es el proceso más económico para un número aproximado menor a 20 mil piezas.

incremental en el costo del dado para los dados más grandes es relativamente pequeño, (b) la maquinaria y las operaciones involucradas son esencialmente las mismas, independientemente del tamaño de la forja, y (c) la mano de obra necesaria por pieza fabricada no es mucho más alta.

El costo total involucrado en una operación de forjado no se ve influido en un grado importante por el tipo de materiales forjados. Debido a que ahora se han visto reducidos de manera significativa por las operaciones automatizadas y controladas por computadora, en el forjado los costos de mano de obra suelen ser moderados. Por otra parte, el diseño y la manufactura de dados se realizan mayormente utilizando las técnicas de diseño y manufactura asistidos por computadora (capítulo 38), lo que resulta en un ahorro importante de tiempo y esfuerzo.

El costo de forjar una pieza, en comparación con el de su producción mediante diversos procesos como la fundición, metalurgia de polvos, maquinado u otros métodos, es una consideración importante. Por ejemplo, para las corridas de producción más cortas con todos los demás factores en el mismo nivel, la manufactura de cierta pieza por, digamos, fundición en molde desechable puede ser más económica que si se produce mediante forjado (figura 14.22). Recuerde que este método de fundición no requiere moldes y herramientas costosas, mientras que el forjado normalmente necesita dados muy caros. Los aspectos competitivos de la manufactura y el proceso de selección se analizan con mayor detalle en el capítulo 40.

CASO DE ESTUDIO 14.2 Componentes de la suspensión del automóvil Lotus Elise

La industria automotriz se ve sometida cada vez más a una exigente serie de regulaciones sobre rendimiento, costo, seguridad, eficiencia del combustible y respeto al medio ambiente. Una de las estrategias principales para mejorar el diseño de los vehículos en relación con todas estas posiblemente conflictivas restricciones consiste en reducir el peso del vehículo al mismo tiempo que se utilizan materiales y procesos de manufactura avanzados. La optimización del diseño anterior de este automóvil ha demostrado que se puede lograr un ahorro en el peso de hasta 34% en los componentes del sistema de suspensión, ahorro significativo puesto que las suspensiones constituyen aproximadamente el 12% de la masa de un automóvil.

El ahorro en peso podría lograrse en gran parte mediante el desarrollo de diseños óptimos, utilizando herramientas avanzadas de análisis y empleando piezas forjadas de acero de forma neta o casi neta, en vez de componentes de hierro fundido. Además, se ha demostrado que es posible lograr ahorros significativos en los costos de muchas piezas al utilizar piezas forjadas de acero, en lugar de fundiciones y extrusiones de aluminio.

El Lotus Elise es un automóvil deportivo de alto rendimiento (figura 14.23a) diseñado para una conducción y un manejo superiores. El grupo de Lotus investigó el uso de piezas forjadas de acero, en lugar de soportes de suspensión hechos con aluminio extruido, con el fin de reducir el costo y mejorar la confiabilidad y el rendimiento. Sus esfuerzos de desarrollo constaron de dos fases, que se muestran en las figuras 14.23b y c. La primera fase consistió en el desarrollo de un componente de acero forjado que podría utilizarse en

el automóvil deportivo Elise ya existente; la segunda fase implicó la producción de una suspensión vertical para un nuevo modelo. Se desarrolló un nuevo diseño usando un proceso iterativo, con herramientas de software avanzadas, para reducir el número de componentes y determinar la geometría óptima. El material seleccionado para el soporte fue un acero forjado enfriado al aire que proporciona un tamaño de grano y una microestructura uniformes, así como una alta resistencia de las piezas sin necesidad de tratamiento térmico. Estos materiales también tienen resistencias a la fatiga aproximadamente 20% más altas que los aceros al carbono tradicionales, como el AISI 1548-HT que es usado en aplicaciones similares.

En la tabla 14.5 se muestra un resumen de los diseños revisados. Como puede verse, el nuevo diseño optimizado de forja (figura 14.23d) dio lugar a ahorros significativos en los costos. Aunque también se generó un pequeño aumento del peso, en comparación con el diseño de extrusión de aluminio, el costo a pagar por ello se reconoce como bastante menor. Por otra parte, el uso de acero forjado para estos componentes resulta especialmente ventajoso en las condiciones de carga a la fatiga que los componentes de la suspensión experimentan en forma constante. El nuevo diseño también obtuvo ciertas ventajas de rendimiento en cuanto a que la rigidez del componente es ahora más alta, lo cual registra una mejora en la satisfacción del cliente y una mejor “sensación” durante la conducción. El nuevo diseño también reduce el número de piezas requerido, cumpliendo así otro principio fundamental del diseño.

(continúa)

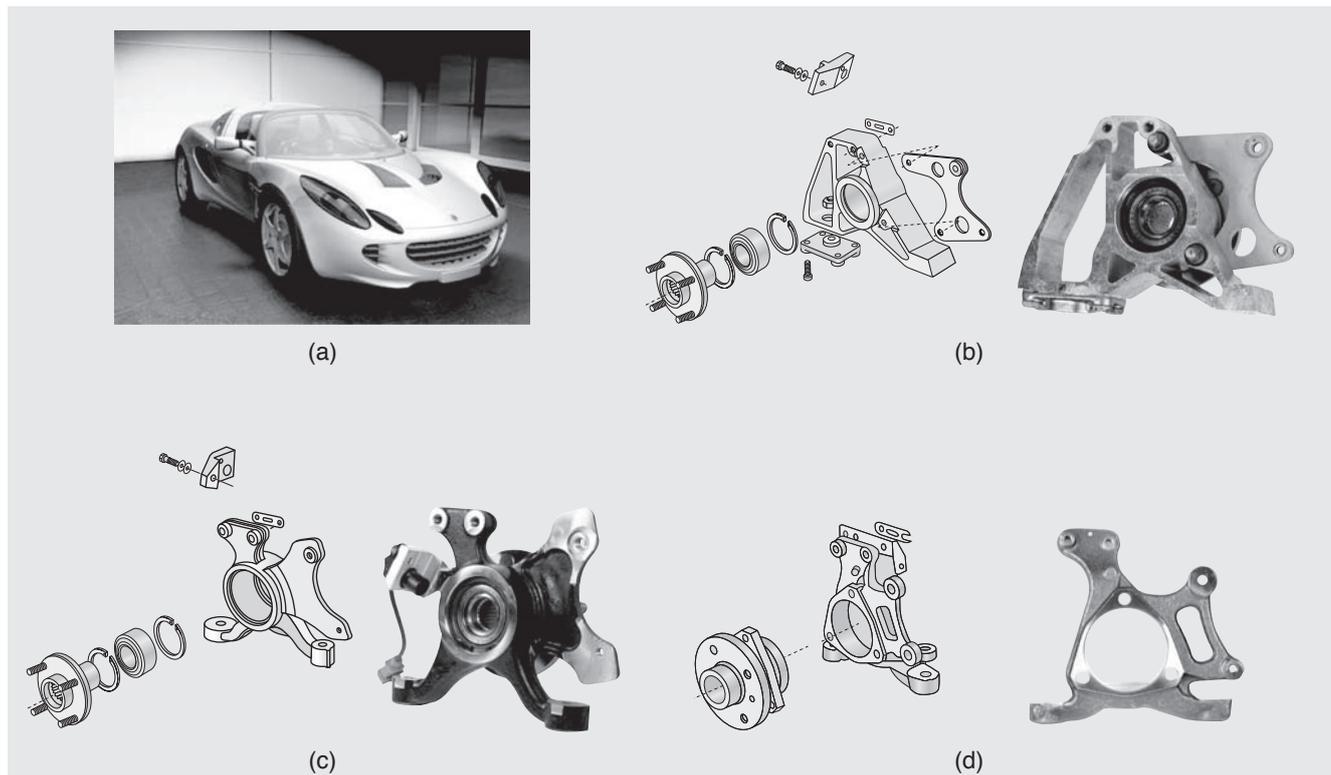


FIGURA 14.23 (a) Automóvil Lotus Elise Serie 2; (b) ilustración del diseño original de los soportes verticales de la suspensión utilizando una extrusión de aluminio; (c) diseño modificado usando acero forjado y (d) diseño con acero forjado optimizado para los nuevos modelos del automóvil. Fuente: (a) Cortesía de Fox Valley Motorcars; (b) a (d) cortesía del American Iron and Steel Institute.

TABLA 14.5

Comparación de los diseños de suspensión vertical para el automóvil Lotus Elise				
Bosquejo de la figura 14.23	Material	Aplicación	Masa (kg)	Costo (\$)
(b)	Extrusión de aluminio, soporte de acero, buje de acero, carcasa	Diseño original	2.105	85
(c)	Acero forjado	Fase I	2.685 (+28%)	27.7 (-67%)
(d)	Acero forjado	Fase II	2.493 (+18%)	30.8 (-64%)

Fuente: Cortesía del American Iron and Steel Institute.

RESUMEN

- El término forjado denota una familia de procesos metalúrgicos en los que se lleva a cabo la deformación de una pieza de trabajo mediante fuerzas de compresión aplicadas a través de un conjunto de dados. El forjado es capaz de producir una amplia variedad

de piezas estructurales con características favorables como una mayor resistencia, tenacidad mejorada, precisión dimensional y confiabilidad durante el servicio.

- El proceso de forjado puede llevarse a cabo a temperatura ambiente o a temperaturas medias o altas. El comportamiento del material de la pieza de trabajo durante la deformación, la fricción, la transferencia de calor y las características de flujo del material en la cavidad del dado son consideraciones importantes, como lo son también la selección adecuada de los materiales del dado, los lubricantes, las temperaturas de la pieza de trabajo y del dado, las velocidades de forjado y los equipos.
- Si el proceso no se diseña ni se controla adecuadamente, pueden desarrollarse diversos defectos. En la actualidad, se usan ampliamente las técnicas de diseño y manufactura asistidos por computadora para el diseño y la fabricación de dados, diseño de preformas, predicción del flujo de material y para evitar la aparición de defectos internos y externos durante el forjado.
- Existe una diversidad de máquinas de forjado disponibles, cada una con sus propias capacidades y características. Las operaciones de forjado están altamente automatizadas, utilizando robots industriales y controles por computadora.
- En el forjado rotativo, el diámetro de una barra sólida o un tubo se reduce mediante el movimiento radial recíproco de un juego de dos o cuatro dados. El proceso es adecuado para producir tramos cortos o largos de barra o tubo con diversos perfiles internos o externos.
- Debido a que la falla en los dados tiene un impacto económico importante, el diseño del dado, la selección de materiales y los métodos de producción poseen gran importancia. Existe una diversidad de materiales y métodos para la fabricación de dados, incluyendo procesos avanzados de remoción de material y acabado.

TÉRMINOS CLAVE

Abarrilamiento	Forjado con dado impresor	Forjado orbital	Prensas
Acuñado	Forjado de forma neta	Forjado rotativo	Prueba de torsión en caliente
Cabeceado	Forjado de precisión	Formado con dado cóncavo	Punzonado de cavidades
Calibrado	Forjado en dado abierto	Formado con dado convexo	(clavado)
Forja de desbaste a martillo	Forjado en dado cerrado	Granos en el extremo	Rebaba
Forjabilidad	Forjado incremental	Martillos	Recalcado
Forjado	Forjado isotérmico	Penetrado	

BIBLIOGRAFÍA

- Altan, T., Ngaile, G. y Shen, G. (eds.), **Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications**, ASM International, 2005.
- ASM *Handbook*, Vol. 14A: **Metalworking: Bulk Forming**, ASM International, 2005.
- Boljanovic, V., **Metal Shaping Processes**, Industrial Press, 2009.
- Byrer, T. G. (ed.), **Forging Handbook**, Forging Industry Association, 1985.
- Dieter, G. E., Kuhn, H. A. y Semiatin, S. L. (eds.), **Handbook of Workability and Process Design**, ASM International, 2003.
- Hosford, W. F. y Caddell, R. M., **Metal Forming: Mechanics and Metallurgy**, 4a. ed., Cambridge, 2011.
- Product Design Guide for Forging**, Forging Industry Association, 1997.
- Spitler, D., Lantrip, J., Nee, J. y Smith, D. A., **Fundamentals of Tool Design**, 5a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 2003.
- Tschaetch, H., **Metal Forming Practice: Processes, Machines, Tools**, Springer, 2007.

PREGUNTAS DE REPASO

- 14.1** ¿Cuál es la diferencia entre el forjado en frío, en tibio y en caliente?
- 14.2** Explique la diferencia entre el forjado en dado abierto y con dado impresor.
- 14.3** Explique la diferencia entre el forjado con dado convexo, el forjado con dado cóncavo y el bloqueo.
- 14.4** ¿Qué es la rebaba? ¿Cuál es su función?
- 14.5** ¿Por qué es importante la forma intermedia de una pieza en las operaciones de forjado?
- 14.6** Describa las características de un dado de forjado típico.
- 14.7** Explique lo que se entiende por “carga limitada”, “energía limitada” y “carrera limitada” en relación con las máquinas de forjado.

- 14.8** ¿Qué tipo de piezas pueden producirse mediante el forjado rotativo?
- 14.9** ¿Por qué el punzonado de cavidades es una alternativa atractiva para la producción de dados sencillos?
- 14.10** ¿Cuál es la diferencia entre penetrado y punzonado?
- 14.11** ¿Qué es un martillo? ¿Cuáles son los diferentes tipos de martillos?
- 14.12** ¿Por qué hay abarrilamiento en el recalado?
- 14.13** ¿Cuáles son las ventajas y desventajas del forjado isotérmico?
- 14.14** ¿Por qué son necesarios los ángulos de salida en los dados de forjado?
- 14.15** ¿En el forjado rotativo se requiere un mandril?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 14.16** Describa y explique los factores que influyen en el ensanchado en las operaciones de desbaste sobre palanquillas largas y cuadradas.
- 14.17** ¿Cómo se puede saber si una pieza está forjada o fue fundida? Explique las características que usted investigaría.
- 14.18** Identifique las reglas de diseño de fundiciones, descritas en la sección 12.2, que también pueden aplicarse al forjado.
- 14.19** Describa los factores que intervienen en el forjado de precisión.
- 14.20** ¿Por qué es importante el control del volumen de la pieza en bruto en el forjado en dado cerrado?
- 14.21** ¿Por qué hay tantos tipos de máquinas de forjado disponibles? Describa las capacidades y limitaciones de cada tipo.
- 14.22** ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de las operaciones de desbaste? ¿El desbaste debe realizarse en caliente o en frío? Explique su respuesta.
- 14.23** ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones del uso de insertos de dado? Proporcione algunos ejemplos.
- 14.24** Revise la figura 14.6e y explique por qué los ángulos de salida internos son más grandes que los ángulos de salida externos. ¿Esto es cierto también para la fundición en molde permanente?

- 14.25** Comente sus observaciones acerca del modelo de flujo de grano mostrado en la figura 14.13b.
- 14.26** Describa sus observaciones en relación con el control del grosor final del tubo de la figura 14.16a.
- 14.27** Mediante la inspección de algunos productos forjados, como las herramientas manuales, se dará cuenta de que las letras incluidas en éstas están resaltadas y no hundidas. Proporcione una explicación del por qué se hacen así.
- 14.28** Describa las dificultades involucradas en la definición del término “forjabilidad” de manera precisa.
- 14.29** Describa las ventajas de las servoprensas de forjado y estampado.
- 14.30** Liste las recomendaciones generales que usted haría para los materiales de forjado con ductilidad limitada.
- 14.31** ¿Qué recomendaría usted, (a) forjar en caliente y tratar térmicamente una pieza de trabajo o (b) forjar en frío y confiar en el endurecimiento por deformación para darle resistencia a la pieza? Explique su respuesta.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

- 14.32** Tome dos muestras sólidas cilíndricas de igual diámetro, pero con diferentes alturas, y comprímalas (sin fricción) hasta el mismo porcentaje de reducción en la altura. Demuestre que los diámetros finales serán iguales.
- 14.33** Calcule la fuerza de forjado a temperatura ambiente para una pieza de trabajo sólida y cilíndrica, hecha de aluminio 5052-O con 3.5 pulg de alto y 5 pulg de diámetro, la cual debe reducir su altura en 30%. Considere que el coeficiente de fricción es 0.15.
- 14.34** Con base en la ecuación (14.2), estime la fuerza de forjado para la pieza de trabajo del problema 14.33, suponiendo que es un forjado complejo y que el área proyectada de la rebaba es 30% mayor que el área proyectada de la pieza de trabajo forjada.

- 14.35** ¿Hasta qué espesor puede forjarse un cilindro sólido de acero 1020 con 1 pulg de diámetro y 2 pulg de altura en una prensa que puede generar 100 000 libras?
- 14.36** En el ejemplo 14.1, calcule la fuerza de forjado suponiendo que el material es aluminio 1100-O y que el coeficiente de fricción es 0.10.
- 14.37** Con base en la ecuación (14.1), haga una gráfica de la fuerza de forjado, F , como una función del radio, r , de la pieza de trabajo. Suponga que el esfuerzo de flujo, Y_f , del material es constante. Recuerde que el volumen del material se mantiene constante durante el forjado por lo que, a medida que h disminuye, r aumenta.

14.38 ¿Cómo haría usted para estimar la fuerza del punzón requerida en una operación de punzonado de cavidades suponiendo que el material es acero blando y el área proyectada de la impresión es de 0.5 pulg^2 ? Explique su respuesta. (*Sugerencia:* vea la sección 2.6 sobre la dureza).

14.39 Una prensa mecánica está impulsada por un motor de 30 hp y funciona a 40 carreras por minuto. La prensa utiliza un volante de inercia, de modo que la velocidad del cigüeñal no varía apreciablemente durante la carrera. Si la carrera es de 6 pulg, ¿cuál es la fuerza constante máxima que puede ser ejercida en toda la longitud de la carrera?

14.40 Una muestra cilíndrica y sólida, hecha de un material perfectamente plástico, se recalca entre dados planos sin fricción. El proceso se lleva a cabo mediante la caída de un peso, como

la caída de un martillo. La velocidad de descenso del martillo llega a un máximo cuando tiene el primer contacto con la pieza de trabajo y se convierte en cero cuando el martillo se detiene a cierta altura de la muestra. Establezca las relaciones cuantitativas entre la altura de la pieza de trabajo y la velocidad y haga un bosquejo cualitativo del perfil de la velocidad del martillo. (*Sugerencia:* La pérdida de energía cinética del martillo es el trabajo plástico de deformación, por lo que hay una relación directa entre la altura de la pieza de trabajo y la velocidad).

14.41 Suponga que usted es un profesor que cubre los temas descritos en este capítulo y aplicará un examen de los aspectos numéricos para probar la comprensión de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

14.42 Diseñe un método experimental mediante el cual usted pueda medir solamente la fuerza requerida para forjar la rebaba en un forjado con dado impresor.

14.43 Suponga que usted representa a la industria del forjado y se enfrenta a un representante de la industria de la fundición. ¿Qué le diría a esa persona acerca de los méritos de los procesos de forjado?

14.44 La figura P14.44 muestra una pieza forjada con dado impresor a partir de una pieza en bruto cilíndrica, la cual se ilustra a la izquierda. Como se describió en este capítulo, las piezas se hacen en una secuencia de operaciones de forjado. Sugiera una secuencia de pasos intermedios de forjado para fabricar la pieza de la derecha y dibuje la forma de los dados requeridos.

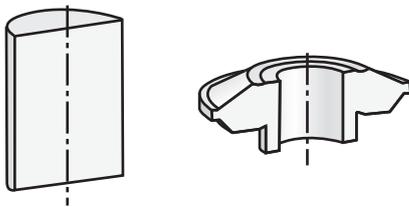


FIGURA P14.44

14.45 Al comparar las piezas forjadas con las piezas fundidas, hemos observado que la misma pieza puede hacerse mediante cualquiera de los procesos. Comente sobre los pros y contras de cada proceso teniendo en cuenta factores como el tamaño de la pieza, la complejidad de la forma, la flexibilidad del diseño, las propiedades mecánicas desarrolladas y el desempeño durante el servicio.

14.46 A partir de los datos de la tabla 14.3, obtenga el valor aproximado de la resistencia a la cedencia para los materiales que se listan en sus temperaturas de forjado en caliente.

14.47 Revise la secuencia de operaciones implicadas en la producción del pasador escalonado que se muestra en la figura 14.14. Si no se realiza la etapa de recalado cónico, ¿cómo se vería afectada la pieza final?

14.48 Use una pieza plana de madera y realice operaciones simples de desbaste sobre piezas de arcilla, luego escriba sus observaciones acerca del ensanchado de las piezas en función de las secciones transversales originales (por ejemplo, cuadradas o rectangulares con diferentes relaciones de ancho a espesor).

14.49 Analice las posibles preocupaciones ambientales en relación con las operaciones descritas en este capítulo.

14.50 Liste las ventajas y desventajas del uso de lubricantes en las operaciones de forjado.

15

Procesos y equipos para extrusión y trefilado de metales

15.1	Introducción	364
15.2	El proceso de extrusión	366
15.3	Extrusión en caliente	368
15.4	Extrusión en frío	372
15.5	Defectos en la extrusión	374
15.6	Consideraciones de diseño	376
15.7	Equipos para extrusión	376
15.8	El proceso de trefilado	377
15.9	Práctica del trefilado	379
15.10	Defectos y esfuerzos residuales en el trefilado	382
15.11	Equipos para trefilado	382

EJEMPLO:

15.1	Cálculo de la fuerza en la extrusión en caliente	367
------	--	-----

CASOS DE ESTUDIO:

15.1	Manufactura de disipadores de calor de aluminio	371
15.2	Pieza extruida en frío	373

- La extrusión y el trefilado implican, respectivamente, empujar o jalar un material a través de un dado con el propósito de modificar su sección transversal.
- El capítulo comienza con la descripción de los tipos básicos de procesos de extrusión y de cómo puede estimarse la fuerza de extrusión a partir de los parámetros del material y de su procesamiento.
- Después se estudian las extrusiones en caliente y en frío, incluyendo el diseño de dados y una descripción de la manera en que la extrusión en frío suele realizarse en combinación con el forjado para producir piezas con formas específicas.
- También se presentan las prácticas de extrusión y el diseño de dados para evitar la aparición de defectos comunes.
- A continuación, se estudia de manera similar el trefilado de varillas, alambres y tubos junto con las consideraciones sobre el diseño de los dados.
- También se describen las características de los equipos utilizados para desarrollar estos procesos.

Piezas típicas hechas por extrusión y trefilado: Piezas largas que tienen una amplia variedad de secciones transversales constantes, varillas, ejes, barras para el sistema de propulsión en maquinaria y automóviles, escaleras de aluminio, tubos plegables y cables para diversas aplicaciones eléctricas y mecánicas, así como para instrumentos musicales.

Procesos alternativos: Maquinado, metalurgia de polvos, laminado de forma, formado con rodillos, pultrusión y fundición continua.

15.1 Introducción

La extrusión y el trefilado tienen numerosas aplicaciones en la manufactura de productos continuos y discretos a partir de una amplia variedad de metales y aleaciones. En la extrusión, una palanquilla generalmente cilíndrica es forzada a pasar a través de un dado (figura 15.1), de manera similar a la compresión de un tubo de pasta dental. Mediante la extrusión, es posible producir una amplia variedad de secciones transversales sólidas o huecas que son, esencialmente, productos semiacabados.

Una característica de la extrusión (del latín *extrudere*, que significa “forzar a salir”) es que puede dar lugar a grandes deformaciones sin que se presente fractura del material (vea la sección 2.2.8), ya que el material se somete a altos esfuerzos de compresión triaxiales. Dado que la geometría del dado se mantiene sin cambios durante todo el proceso, por lo general los productos extruidos tienen una sección transversal constante.

Los productos típicos hechos por extrusión son rieles para puertas corredizas, marcos de ventana, tuberías, marcos para escaleras de aluminio y perfiles estructurales y arquitectónicos. Las extrusiones pueden cortarse en las longitudes deseadas, que luego se

convierten en piezas discretas como soportes, engranes y perchas (figura 15.2). Comúnmente, los metales que se extruyen son aluminio, cobre, acero, magnesio y plomo; también pueden extruirse otros metales y aleaciones, con diversos niveles de dificultad.

Cada palanquilla se extruye en forma individual, por lo que la extrusión es una operación por lotes o semicontinua. El proceso puede ser económico tanto para grandes corridas de producción como para corridas pequeñas. Por lo general, los costos de las herramientas son bajos, sobre todo para producir secciones transversales sencillas y sólidas. Dependiendo de la ductilidad requerida del material, el proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas. La extrusión a temperatura ambiente suele combinarse con operaciones de forjado, en cuyo caso se denomina comúnmente **extrusión en frío** (vea también la sección 14.4), y tiene numerosas aplicaciones tales como elementos de sujeción y componentes de automóviles, bicicletas, motocicletas, maquinaria pesada y equipo de transporte.

En el **trefilado**, un proceso que se desarrolló entre los años 1000 y 1500 d. C., la sección transversal de una barra sólida, un alambre o un tubo se reduce o cambia su forma jalando la pieza en bruto a través de un dado. Las barras estiradas se utilizan para ejes, husillos y pequeños pistones y como materia prima para elementos de sujeción como remaches, pernos y tornillos. Además de barras redondas, también se pueden trefilar diversos perfiles.

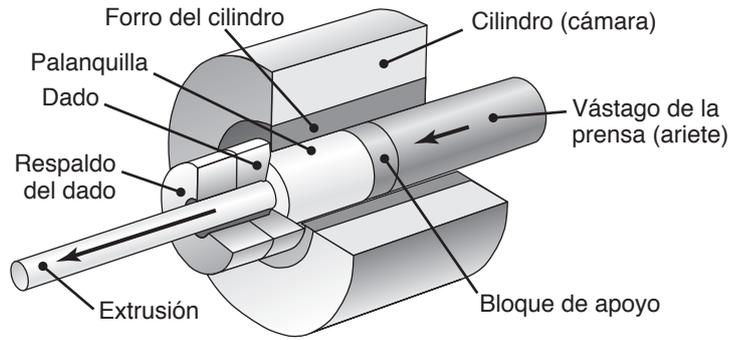


FIGURA 15.1 Ilustración esquemática del proceso de extrusión directa.



Código QR 15.1 Extrusión de aluminio. (Fuente: Cortesía de PBC Linear, una compañía de Bearing Pacific).

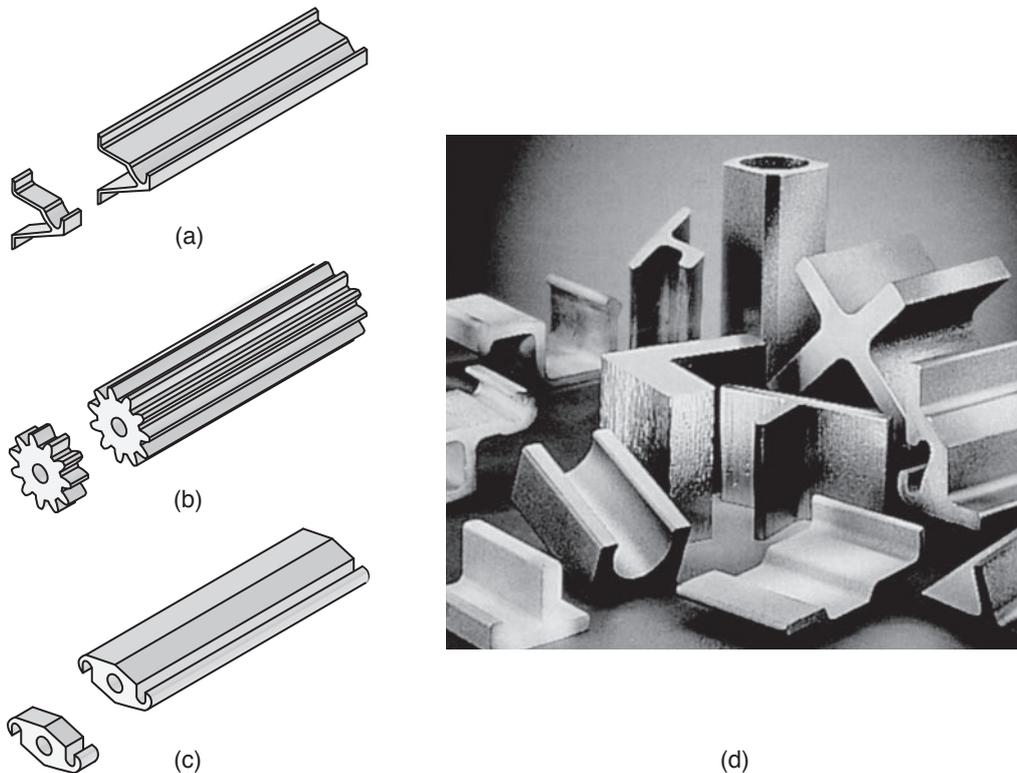


FIGURA 15.2 Extrusiones y ejemplos de productos fabricados mediante el seccionamiento de extrusiones. Fuente: (d) Cortesía de Plymouth Extruded Shapes (para la extrusión de plásticos, vea la sección 19.2).

La distinción entre los términos **barra** y **alambre** es algo arbitraria, se considera que las barras tienen secciones transversales más grandes que los alambres. En la industria, el alambre se define generalmente como una barra que ha sido trefilada mediante un dado al menos una vez, o que su diámetro es lo suficientemente pequeño como para que pueda ser enrollado. El trefilado de alambre involucra diámetros mucho más pequeños que el trefilado de barra, con tamaños de hasta 0.01 mm (0.0004 pulg) para el alambre de magneto y aun menores para uso en fusibles de corrientes muy bajas.

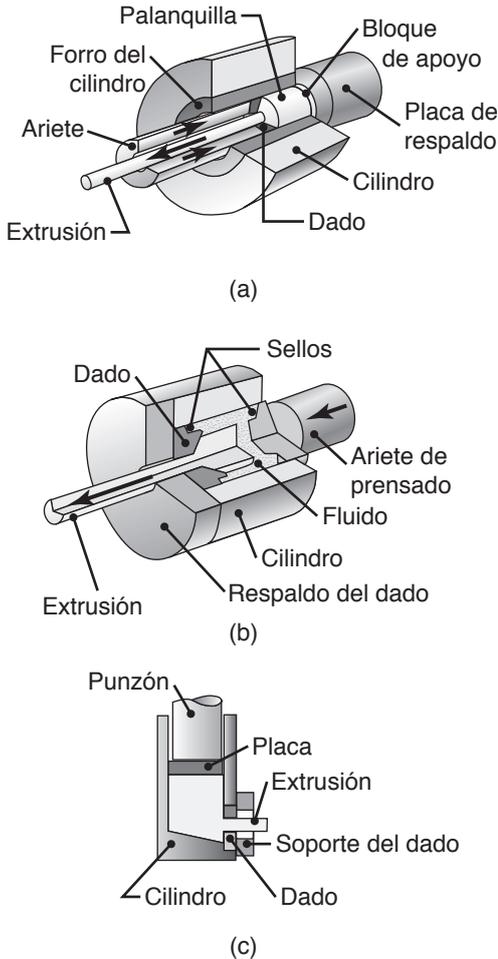


FIGURA 15.3 Tipos de extrusión: (a) indirecta; (b) hidrostática y (c) lateral.

15.2 El proceso de extrusión

Existen tres tipos básicos de extrusión. En la extrusión **directa** o **hacia adelante**, una palanquilla se coloca en un cilindro (*cámara*) y se fuerza a pasar a través de un dado, como se muestra en la figura 15.1. La abertura del dado puede ser redonda o tener diversas formas, dependiendo del perfil deseado. La función del bloque de apoyo que se muestra en la figura es proteger la punta del ariete de prensado (punzón), en particular en la extrusión en caliente.

En la extrusión **indirecta**, llamada también *extrusión inversa*, *invertida* o *hacia atrás*, el dado se mueve hacia la palanquilla sin extruir (figura 15.3a). La extrusión indirecta tiene la ventaja de no ejercer ninguna fricción entre la palanquilla y el cilindro, puesto que no hay movimiento relativo; por esta razón, se utiliza en materiales con fricción muy alta como en la extrusión en caliente de aceros inoxidable de alta resistencia.

En la **extrusión hidrostática** (figura 15.3b), la palanquilla es más pequeña en diámetro que el cilindro (el cual se llena con un fluido) y se transmite presión al fluido mediante un émbolo. La presión del fluido imparte esfuerzos de compresión triaxial que actúan sobre la pieza de trabajo y, por lo tanto, adquiere una formabilidad mejorada (sección 2.10). Además, hay mucha menos fricción de la pieza de trabajo con el cilindro que en la extrusión directa. Un tipo menos común de extrusión es la *extrusión lateral* (figura 15.3c).

Como puede verse en la figura 15.4, las variables geométricas involucradas en la extrusión son el ángulo del dado, α , y la relación del área de la sección transversal de la palanquilla sobre la de la parte extruida, A_o/A_f , llamada **relación de extrusión**, R . Otras variables del proceso son la temperatura de la palanquilla, la velocidad a la que viaja el ariete y el tipo de lubricante utilizado.

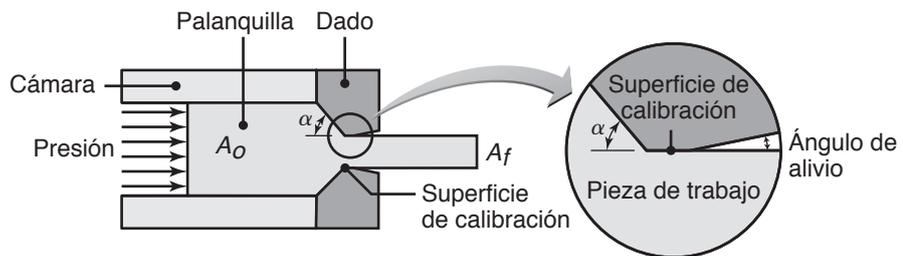


FIGURA 15.4 Variables del proceso en la extrusión directa; el ángulo del dado, la reducción de la sección transversal, la velocidad de extrusión, la temperatura de la palanquilla y la lubricación afectan a la presión de extrusión.

Fuerza de extrusión. La fuerza necesaria para efectuar la extrusión depende de (a) la resistencia del material de la palanquilla, (b) la relación de extrusión, (c) la fricción entre las superficies de la palanquilla, el cilindro y el dado, así como (d) las variables del proceso. Para un ángulo de dado, α , pequeño, se ha demostrado que la presión de extrusión puede aproximarse como

$$p = Y \left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) (R^{\mu \cot \alpha} - 1), \quad (15.1)$$

donde μ es el coeficiente de fricción, Y es el esfuerzo de cedencia del material de la palanquilla y R es la relación de extrusión. Entonces, es posible obtener la fuerza de extrusión al multiplicar la presión por el área de la palanquilla, y puede simplificarse como

$$F = A_o k \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right), \quad (15.2)$$

donde k es la constante de extrusión, determinada experimentalmente; por lo tanto, k es una medida de la resistencia del material que se extruye y de las condiciones de fricción. La figura 15.5 proporciona los valores de k para diversos metales considerados en cierto rango de temperaturas de extrusión.

EJEMPLO 15.1 Cálculo de la fuerza en la extrusión en caliente

Dado: Un palanquilla redonda de latón 70-30 se extruye a una temperatura de 1250 °F (675 °C). El diámetro de la palanquilla es de 5 pulg (125 mm) y el diámetro de la extrusión es de 2 pulg (50 mm).

Se solicita: Calcular la fuerza de extrusión requerida.

Respuesta: La fuerza de extrusión se calcula usando la ecuación (15.2), en la que la constante de extrusión, k ,

se obtiene con base en la figura 15.5. Para el latón 70-30, $k = 35\,000$ psi (250 MPa) en la temperatura de extrusión dada. Por lo tanto,

$$F = \pi(2.5)^2(35\,000) \ln \left[\frac{\pi(2.5)^2}{\pi(1.0)^2} \right] = 1.26 \times 10^6 \text{ lb} \\ = 630 \text{ tons} = 5.5 \text{ MN.}$$

Flujo de metal en la extrusión. El patrón del flujo de metal en la extrusión, como en otros procesos de formado, es importante debido a su influencia en la calidad y en las propiedades del producto extruido. El material fluye longitudinalmente, de igual modo que un flujo de fluido no comprimible en un canal; por lo tanto, los productos extruidos tienen una estructura de grano alargada (*orientación preferida*, sección 1.6). El flujo inadecuado del metal durante la extrusión puede producir varios defectos en el producto extruido, como se describe en la sección 15.5.

Una técnica común para investigar el patrón de flujo consiste en cortar a la mitad, en dirección longitudinal, la palanquilla redonda y marcar una cara con un patrón cuadrículado. Las dos mitades se colocan juntas en la cámara y se extruyen. La figura 15.6 muestra los patrones de flujo típicos obtenidos mediante esta técnica, para el caso de la extrusión directa con dados rectos (ángulo de dado a 90°). Las condiciones bajo las cuales se producen estos diferentes patrones de flujo se describen en los incisos de la figura 15.6. Note la **zona muerta de metal** señalada en las figuras 15.6b y c, donde el metal de las esquinas esencialmente está inmóvil; esta situación es similar al estancamiento del flujo de fluido en los canales que tienen ángulos agudos o vueltas repentinas.

Parámetros del proceso. En la práctica, las relaciones de extrusión, R , por lo general van desde alrededor de 10 hasta 100. Pueden ser más altas para aplicaciones especiales

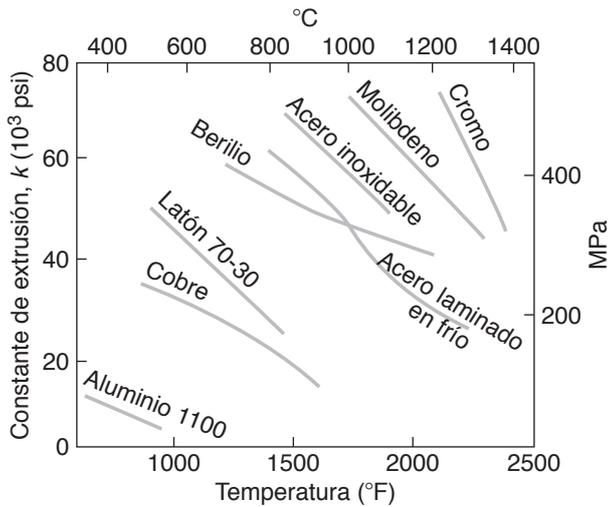


FIGURA 15.5 Constante de extrusión k para diversos metales a diferentes temperaturas de acuerdo con lo determinado experimentalmente. Fuente: Según P. Loewenstein.

(400 para los metales no ferrosos más blandos) o inferiores, para materiales menos dúctiles, aunque usualmente la relación debe ser de al menos 4 para que el material de la mayor parte de la pieza de trabajo se deforme plásticamente. Por lo general, los productos extruidos tienen menos de 7.5 m (25 pies) de largo, debido a la dificultad en el manejo de mayores longitudes, pero pueden ser tan largos como 30 m (100 pies). Las velocidades del ariete son de hasta 0.5 m/s (100 pies/min). Generalmente, se prefieren velocidades más bajas para el aluminio, el magnesio y el cobre y velocidades más altas para los aceros, el titanio y las aleaciones refractarias. Las tolerancias dimensionales de las extrusiones suelen encontrarse en el intervalo de ± 0.25 a 2.5 mm (± 0.01 a 0.1 pulg) y aumentan con el incremento de la sección transversal.

Debido a que tienen una elevada ductilidad, el aluminio, el cobre y el magnesio y sus aleaciones, así como los aceros y los aceros inoxidables, se extruyen con relativa facilidad en numerosas formas. Otros metales, como el titanio y los metales refractarios, también se pueden extruir, pero sólo con cierta dificultad y con un desgaste significativo del dado. La mayoría de los productos extruidos, particularmente aquellos con secciones transversales pequeñas, requieren enderezarse y torcerse. Esto se hace típicamente por estiramiento y torsión del producto extruido, por lo general en una estiradora hidráulica equipada con mordazas.

La presencia de un ángulo en el dado provoca que una pequeña porción del extremo de la palanquilla permanezca en la cámara después de la carrera del martinete. Esta parte, llamada *recorte* o *colilla*, se retira posteriormente cortándola. Alternativamente, puede colocarse otra palanquilla o un bloque de grafito en la cámara para extruir la pieza restante de la extrusión anterior.

En la **extrusión coaxial**, o de revestimiento, se extruyen palanquillas coaxiales en conjunto siempre que la resistencia y la ductilidad de los dos metales sean compatibles. Un ejemplo es el cobre recubierto de plata. También se producen *extrusiones escalonadas* mediante la extrusión parcial de la palanquilla en un dado y luego en dados cada vez más grandes (vea también *extrusión en frío*, sección 15.4). La *extrusión lateral* (figura 15.3c) se utiliza para el revestimiento de alambre y recubrimiento de cables eléctricos con plástico.

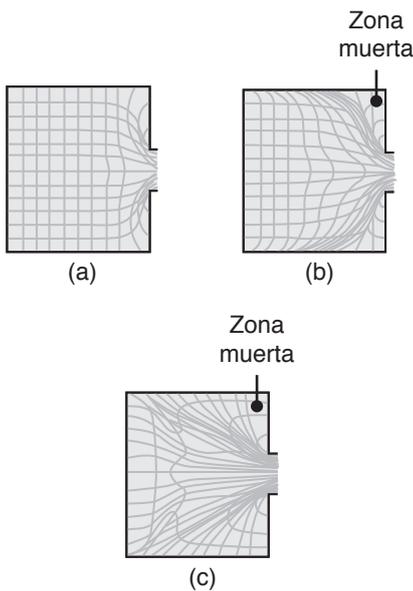


FIGURA 15.6 Tipos de flujo de metal en la extrusión con dados rectos. (a) Patrón de flujo obtenido a baja fricción o en la extrusión indirecta. (b) Patrón obtenido con alta fricción en las interfases de la palanquilla y la cámara. (c) Patrón obtenido a alta fricción o mediante enfriamiento de las regiones externas de la palanquilla caliente en la cámara; este tipo de patrón, observado en metales cuya resistencia aumenta rápidamente con la disminución de la temperatura, conduce a un defecto conocido como defecto de tubo (o de extrusión).

15.3 Extrusión en caliente

Para los metales y las aleaciones que no tienen suficiente ductilidad a temperatura ambiente, o con el fin de reducir las fuerzas requeridas, la extrusión puede realizarse a temperaturas elevadas (tabla 15.1). Igual que en todas las demás operaciones realizadas a temperaturas elevadas, la extrusión en caliente posee requerimientos especiales debido a las altas temperaturas de operación involucradas. Por ejemplo, el desgaste del dado puede ser excesivo y el enfriamiento de las superficies de la palanquilla caliente (en el cilindro enfriador) y el dado puede resultar en una deformación altamente no uniforme de la palanquilla, como se muestra en la figura 15.6c. Por lo tanto, los dados para extrusión pueden precalentarse, como se hace en las operaciones de forjado en caliente (capítulo 14).

Debido a que la palanquilla está caliente, se desarrolla una película de óxido, a menos que se caliente en una atmósfera inerte. Dicha película de óxido

puede ser abrasiva (vea la sección 33.2) y afectar el patrón de flujo del material. Su presencia también da como resultado un producto extruido que puede ser inaceptable cuando se requiere un buen acabado superficial. Con el fin de evitar la formación de películas de óxido en el producto extruido en caliente, el bloque de relleno colocado por delante del ariete (figura 15.1) se hace un poco más pequeño en diámetro que el cilindro. Como resultado, una cáscara delgada (*costra*), que consiste principalmente de la capa oxidada externa formada en la palanquilla, se queda en el cilindro. La costra se retira del cilindro posteriormente.

Diseño de dados. El diseño de dados requiere una experiencia considerable, como puede apreciarse al revisar la figura 15.7. Los *dados rectos*, llamados también *dados de corte*, se utilizan en la extrusión de metales no ferrosos, en especial el aluminio. Estos dados desarrollan *zonas muertas de metal* que, a su vez, forman un “ángulo de dado” (vea las figuras 15.6b y c) a lo largo del cual fluye el material. Estas zonas producen extrusiones con acabados brillantes debido al bruñido (sección 16.2) que se lleva a cabo a medida que el material fluye más allá de la superficie del “ángulo de dado” y del propio dado.

La *tubería* puede extruirse a partir de una palanquilla sólida o hueca (figura 15.8). El espesor de la pared suele estar limitado a 1 mm (0.040 pulg) para el aluminio, 3 mm (0.125 pulg) para los aceros al carbono y 5 mm (0.20 pulg) para los aceros inoxidables. Cuando se utilizan palanquillas sólidas, el ariete está equipado con un mandril que perfo-

TABLA 15.1
Rangos de temperatura de extrusión típicos para diversos metales y aleaciones (vea también la tabla 14.3).

Material	Temperatura de extrusión (°C)
Plomo	200-250
Aluminio y sus aleaciones	375-475
Cobre y sus aleaciones	650-975
Aceros	875-1300
Aleaciones refractarias	975-2200

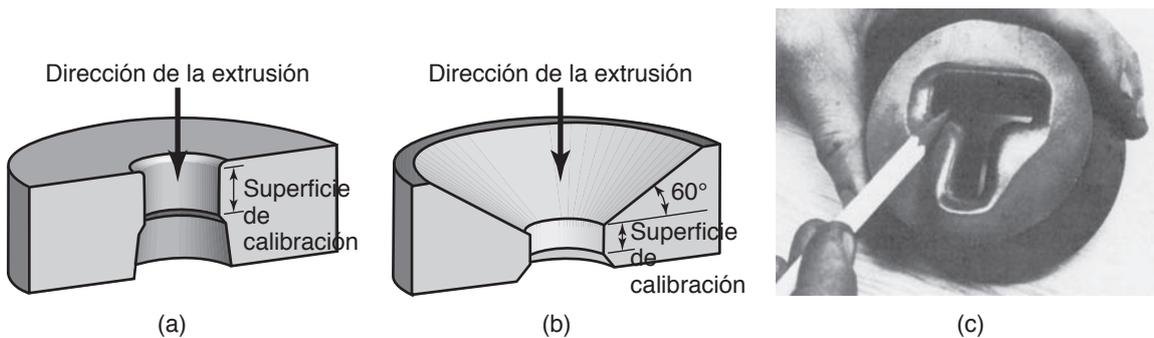


FIGURA 15.7 Formas típicas de dados para extrusión: (a) dado para metales no ferrosos; (b) dado para metales ferrosos; (c) dado para una extrusión en forma de T hecha de acero para trabajo en caliente y usada con vidrio fundido como lubricante. Fuente: (c) Cortesía de LTV Steel Company.

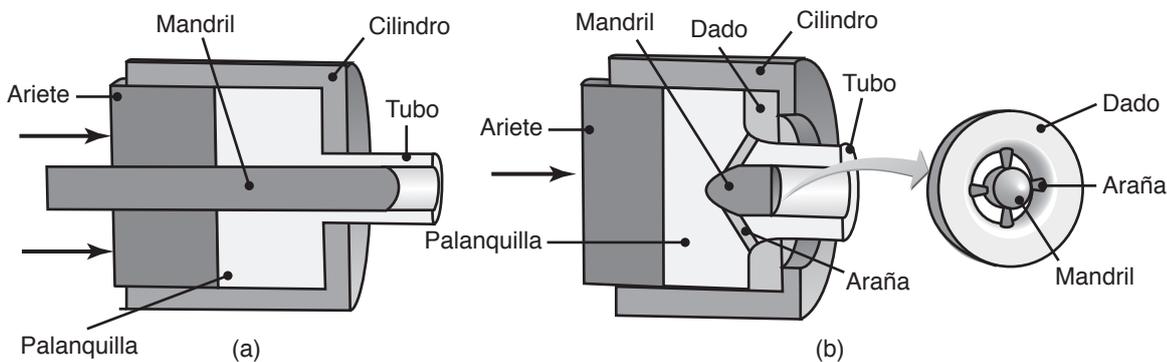


FIGURA 15.8 Extrusión de un tubo sin costura (a) utilizando un mandril interno que se mueve de manera independiente del ariete; un arreglo alternativo tiene el mandril integrado con el ariete y (b) empleando un dado de araña (vea la figura 15.9) para producir tubos sin costura.

ra un orificio en la palanquilla. De esta manera, también pueden extruirse piezas brutas con una perforación previa. Debido a la fricción y a la severidad de la deformación, las extrusiones de pared delgada son más difíciles de producir que las de pared gruesa.

Es posible *extruir secciones transversales huecas* (figura 15.9a) utilizando métodos de cámara de soldadura y diferentes dados conocidos como **dado compuesto** (o dado tipo *ojo de buey*), **dado de araña** y **dado tipo puente** (figuras 15.9b a d). Durante la extrusión, el metal se divide y fluye alrededor de los soportes formando bandas; ésta es una condición muy similar a la del aire que fluye alrededor de un automóvil en movimiento y se vuelve a integrar al pasar el vehículo, o a una corriente de agua que fluye bordeando grandes rocas en un río y vuelve a unirse aguas abajo. Después, las bandas que se están extruyendo se vuelven a soldar, bajo la alta presión de la cámara de soldadura, antes de salir del dado. Las superficies vueltas a soldar tienen buena resistencia debido a que no han estado expuestas al medio; en caso contrario, se desarrollarían óxidos en las superficies, inhibiendo una buena soldadura. El proceso de cámara de soldadura es adecuado sólo para el aluminio y algunas de sus aleaciones, ya que puede desarrollar una soldadura fuerte bajo presión, tal como se describe en la sección 31.2. No es posible utilizar lubricantes porque impiden el resoldado de las superficies de metal presentes en el dado.

Materiales de dado. Por lo general, los materiales de dado para la extrusión en caliente son aceros para dados y matrices para trabajo en caliente (sección 5.7). Es posible aplicar recubrimientos, como el óxido de zirconia parcialmente estabilizada (PSZ, por sus siglas en inglés), en los dados para prolongar su vida. Los dados hechos de PSZ (sección 8.2.2) también se utilizan para la extrusión en caliente de tubos y barras. Sin embargo, no son adecuados en dados para extrusión de formas complejas debido a los severos gradientes de esfuerzo que se desarrollan en el dado, los cuales pueden conducir a su falla prematura.

Lubricación. La lubricación es importante en la extrusión en caliente debido a sus efectos sobre (a) el flujo de material durante la extrusión, (b) el acabado superficial y la integridad, (c) la calidad del producto y (d) las fuerzas de extrusión. El *vidrio* (sección 8.4) es

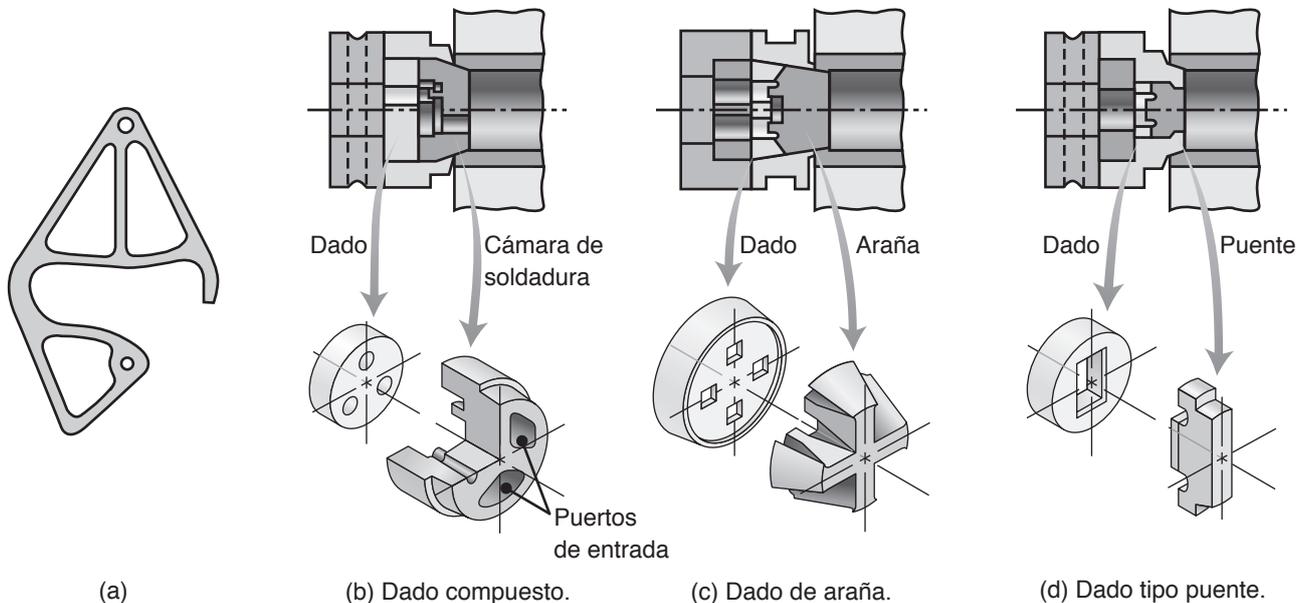


FIGURA 15.9 (a) Seguro para una escalera de extensión hecha de aluminio 6063-T6 extruido, esta pieza tiene un grosor de 8 mm (5/16 pulg) y se corta a partir de la extrusión (vea la figura 15.2). (b) a (d) Componentes de diversos dados para extruir formas huecas intrincadas.

un excelente lubricante para los aceros, aceros inoxidable y metales y para aleaciones de alta temperatura. En un proceso desarrollado en la década de 1940 y conocido como el **proceso de Séjournet** (en honor a J. Séjournet), se coloca una almohadilla circular de vidrio o fibra de vidrio en la cámara a la entrada del dado. La palanquilla caliente conduce el calor hacia la almohadilla de vidrio, después de lo cual se funde una capa delgada de vidrio que actúa como lubricante. Antes de colocar la palanquilla caliente en la cámara, su superficie se recubre con una capa de polvo de vidrio para desarrollar una fina capa de lubricante de cristal en la interfase de la palanquilla con la cámara.

Para los metales que tienen tendencia a pegarse o incluso a soldarse al cilindro y al dado, la palanquilla puede encerrarse en una *camisa*, que es un contenedor de pared delgada hecho de un metal más suave y con resistencia más baja, como el cobre o hierro dulce. Este procedimiento se denomina **encamisado** o **enlatado**. Además de actuar como una interfase de baja fricción, la camisa evita la contaminación de la palanquilla por el medio ambiente. Para los materiales de palanquilla que son tóxicos o radiactivos, la camisa también evita que contaminen el medio ambiente.

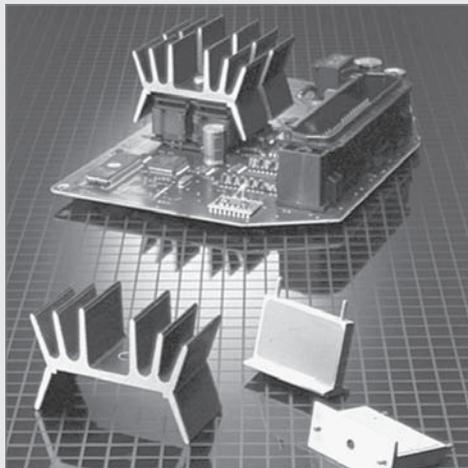
CASO DE ESTUDIO 15.1 Manufactura de disipadores de calor de aluminio

El aluminio se utiliza ampliamente para transferir calor en aplicaciones de enfriamiento y calentamiento debido a su muy alta conductividad térmica. De hecho, con base en la relación peso a costo, ningún otro material conduce el calor tan eficientemente como lo hace el aluminio.

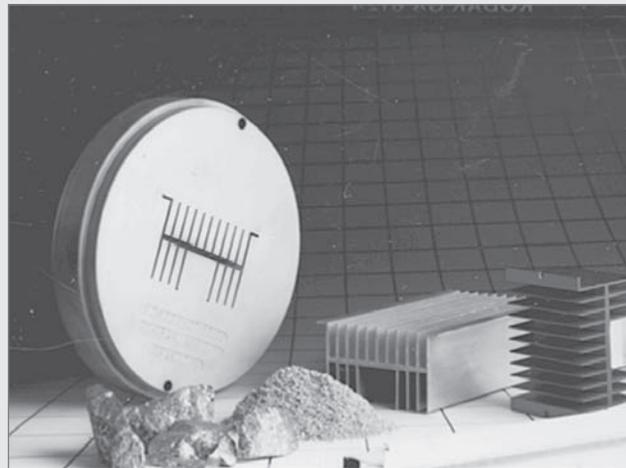
La extrusión en caliente del aluminio es atractiva para aplicaciones en disipadores de calor, como las de la industria electrónica. La figura 15.10a muestra un disipador de calor extruido que se utiliza para eliminar el calor de un transformador en una placa de circuitos impresos. Por lo general, los disipadores de calor están diseñados con un gran número de aletas que maximizan el área superficial y se evalúan con base en un punto de

vista termodinámico utilizando simulaciones por computadora. El maquinado, el forjado o el laminado de aletas es muy difícil y costoso, pero éstas pueden hacerse económicamente por extrusión en caliente usando dados que se fabrican mediante maquinado por descarga eléctrica (o electroerosión) (sección 27.5).

En la figura 15.10b se muestran un dado y una sección transversal extruida en caliente, la cual es adecuada para servir como disipador de calor. Los perfiles que se muestran también podrían producirse a través de una operación de fundición, pero se prefiere la extrusión debido a que no produce porosidad interna y, por lo tanto, la conductividad térmica de la pieza es superior.



(a)



(b)

FIGURA 15.10 (a) Extrusión de aluminio utilizada como disipador de calor para una tarjeta de circuitos impresos. (b) Dado de extrusión y disipadores de calor extruidos. Fuente: Cortesía del Aluminum Extruders Council.

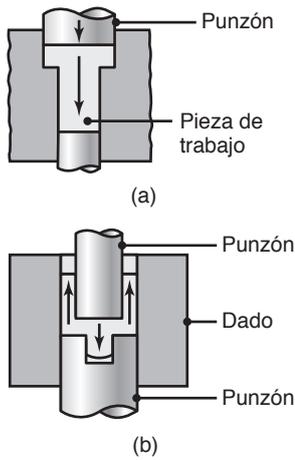


FIGURA 15.11 Dos ejemplos de extrusión en frío; las flechas indican la dirección del flujo de metal durante la extrusión.

15.4 Extrusión en frío

Desarrollada en la década de 1940, la *extrusión en frío* es un término general que a menudo denota una combinación de operaciones, tal como una combinación directa e indirecta de *extrusión* y *forjado* (figura 15.11). La extrusión en frío se usa ampliamente para fabricar componentes de automóviles, motocicletas, bicicletas, electrodomésticos y en el equipo agrícola y de transporte.

El proceso de extrusión en frío utiliza tramos cortados de barras, alambres o placas acabadas en frío o en caliente. Los tramos que tienen diámetros aproximados menores a 40 mm (1.5 pulg) se cortan (*recortan*) y, si es necesario, sus extremos se escuadran mediante procesos como el recalcado, maquinado o rectificado. Tramos de mayor diámetro se maquinan a partir de barras en longitudes específicas. Se pueden hacer piezas extruidas en frío que pesan hasta 45 kg (100 lb) y tienen longitudes de hasta 2 m (80 pulg), aunque la mayoría de las piezas pesan mucho menos. Los tramos de metal en polvo (*preformas*) también pueden extruirse en frío (sección 17.3.3).

La *fuerza*, F , en la extrusión en frío puede estimarse a partir de la fórmula

$$F = 1.7A_o Y_{\text{prom}} \epsilon, \quad (15.3)$$

donde A_o es el área de la sección transversal de la pieza en bruto, Y_{prom} es el esfuerzo medio del flujo de metal, y ϵ es la deformación verdadera a la que se somete la pieza con base en las áreas de su sección transversal original y final. Por ejemplo, suponga que un tramo redondo con 10 mm de diámetro está hecho de un metal con $Y_{\text{prom}} = 50\,000$ psi y que se reduce a un diámetro final de 7 mm mediante extrusión en frío. La fuerza sería

$$F = 1.7(\pi) (10^2/4) (50\,000 [\ln (10/7)^2]) = 4.8 \times 10^6 \text{ lb} = 2140 \text{ tons.}$$

La extrusión en frío tiene las siguientes ventajas sobre la extrusión en caliente:

- Propiedades mecánicas mejoradas, que resultan del endurecimiento por trabajo, siempre que el calor generado por la deformación plástica y la fricción no recristalice el metal extruido.
- Buen control de las tolerancias dimensionales, reduciendo así la necesidad de un maquinado posterior o de operaciones de acabado.
- Acabado superficial mejorado, debido en parte a la ausencia de una película de óxido y siempre que la lubricación sea eficaz.
- Las tasas de producción y los costos son competitivos con los de otros métodos para producir la misma pieza. Algunas máquinas son capaces de producir más de 2000 piezas por hora.

Por otro lado, en la extrusión en frío, la magnitud de los esfuerzos ejercidos sobre las herramientas es muy alta (especialmente con piezas de trabajo hechas de acero y de aleaciones especiales), situándose en el orden de dureza del material de la pieza. Por lo general, la dureza del punzón oscila entre 60 y 65 HRC y la dureza del dado entre 58 y 62 HRC. Los punzones son un componente crítico porque no sólo deben poseer la fuerza suficiente, sino también alta tenacidad y resistencia al desgaste y a la falla por fatiga. La *lubricación* es crucial, especialmente con los aceros, debido a la posibilidad de que la pieza y la herramienta se peguen (*amarren*), en caso de que el lubricante falle. El medio de lubricación más eficaz es la aplicación de una *capa fosfatada modificada* sobre la pieza de trabajo, seguida de un revestimiento de jabón o cera, como se describe en la sección 34.10.

El diseño de los herramientas y la selección de los materiales adecuados para los herramientas y el dado son esenciales para el éxito de la extrusión en frío. También son importantes la selección y el control del material de la pieza con respecto a su calidad y reiterar la precisión de las dimensiones del tramo y su condición superficial.

CASO DE ESTUDIO 15.2 Pieza extruida en frío

En la figura 15.12, se muestra una pieza extruida en frío típica semejante a la del componente metálico de una bujía para el encendido de los automóviles. En primer lugar, se corta un tramo del extremo de una barra redonda (figura 15.12, a la izquierda). Después, se extruye en frío (figura 15.12, pieza de en medio) en una operación similar a las mostradas en la figura 15.11, pero con un orificio ciego. A continuación, el material del fondo del orificio ciego se punzona, produciendo el pequeño puntal mostrado (figura 15.12, tercera pieza desde la izquierda). Observe los respectivos diámetros

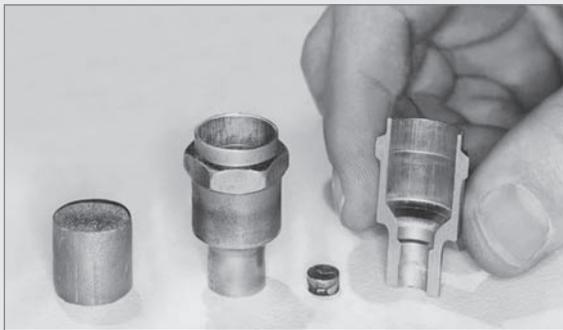


FIGURA 15.12 Pasos de producción para la parte metálica de una bujía extruida en frío. Fuente: Cortesía de National Machinery Company.

del puntal y el orificio en la parte inferior de la pieza seccionada (figura 15.12, a la derecha).

La investigación del flujo de material durante la deformación del puntal ayuda a evitar defectos y conduce a mejorar el diseño del punzón y del dado. Por lo general, la pieza se secciona en el plano medio y después se pule y ataca químicamente para revelar el flujo de grano, como se muestra en la figura 15.13 (vea también la figura 14.13).



FIGURA 15.13 Sección transversal de la pieza metálica mostrada en la figura 15.12 que revela el patrón del flujo de grano (vea también la figura 14.13b). Fuente: Cortesía de National Machinery Company.

15.4.1 Extrusión por impacto

La *extrusión por impacto* es similar a la extrusión indirecta y, a menudo, el proceso se incluye en la categoría de extrusión en frío. El punzón desciende rápidamente sobre la pieza en bruto (tramo), la cual se extruye hacia atrás (figura 15.14). Debido a la constancia de volumen, el grosor de la región tubular extruida está en función de la holgura que hay entre el punzón y la cavidad del dado.

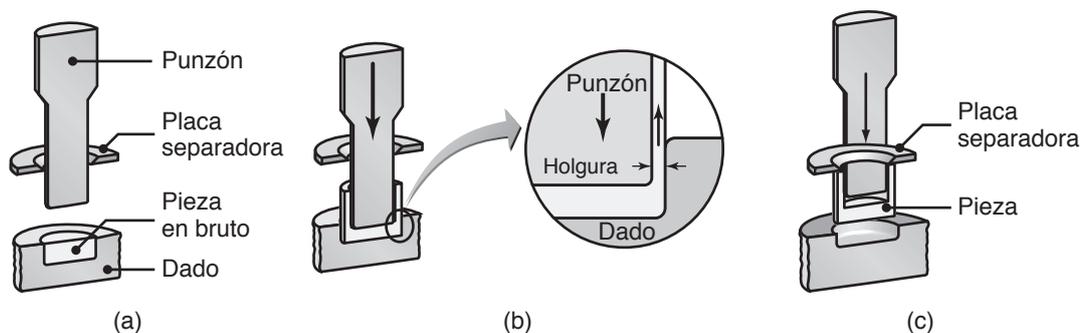


FIGURA 15.14 Ilustración esquemática del proceso de extrusión por impacto; las piezas extruidas se expulsan mediante el uso de una placa separadora.

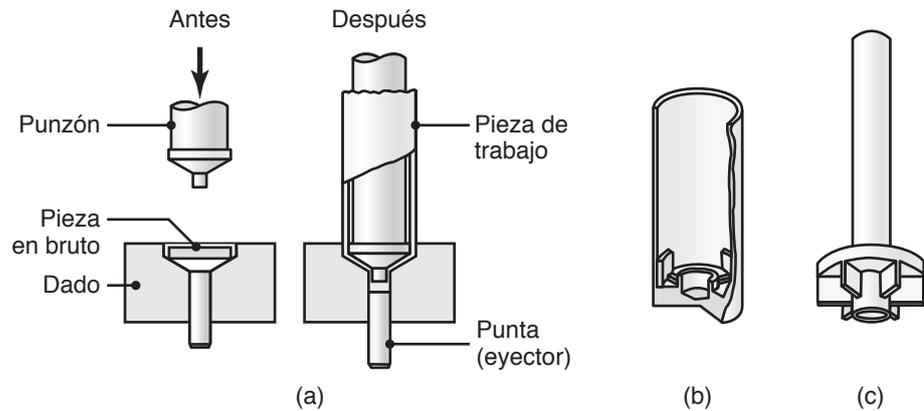


FIGURA 15.15 (a) Extrusión por impacto de un tubo plegable mediante el proceso de Hooker. (b) y (c) Dos ejemplos de productos fabricados mediante extrusión por impacto. Estas piezas también pueden hacerse por fundición, forjado o maquinado, la elección depende de los materiales, las dimensiones de las piezas y el espesor de la pared, así como de las propiedades deseadas. Las consideraciones económicas también son importantes en el proceso de selección final.

Los productos típicos hechos mediante este proceso se muestran en la figura 15.15; otros ejemplos son tubos plegables (similares a los utilizados para la pasta de dientes), lámparas, piezas de automóviles y recipientes para presiones pequeñas. La mayoría de los metales no ferrosos pueden ser extruidos por impacto en prensas verticales y a tasas de producción de hasta dos piezas por segundo.

El diámetro máximo de las piezas que se fabrican es de casi 150 mm (6 pulg). El proceso de extrusión por impacto puede producir secciones tubulares de pared delgada con relaciones de espesor a diámetro tan pequeñas como 0.005. En consecuencia, es importante la simetría de la pieza y que los centros del punzón y de la pieza en bruto coincidan.

15.4.2 Extrusión hidrostática

En la *extrusión hidrostática*, la presión requerida en la cámara es suministrada mediante un pistón y a través de un medio fluido no comprimible que rodea la palanquilla (figura 15.3b). Por lo general, las presiones son del orden de 1400 MPa (200 ksi). La alta presión en la cámara transmite una parte del fluido hacia las superficies del dado, donde la fricción se reduce significativamente. De modo habitual, la extrusión hidrostática se realiza a temperatura ambiente usando, por lo general, aceites vegetales como fluido.

Mediante este método, es posible extruir materiales frágiles con éxito debido a que la presión hidrostática, junto con la baja fricción y el uso de pequeños ángulos de dado y altas relaciones de extrusión, aumentan la ductilidad del material. También se han extruido cables largos a partir de una palanquilla de aluminio, a temperatura ambiente y con una relación de extrusión de 14 000, lo cual significa que un 1 m de palanquilla se convierte en un alambre con 14 km de longitud. A pesar del éxito alcanzado, la extrusión hidrostática ha tenido aplicaciones industriales limitadas, principalmente debido a la naturaleza compleja del herramental, al diseño de equipo especializado y a los largos tiempos de ciclo requeridos, lo cual hace que el proceso sea poco rentable para la mayoría de los materiales y aplicaciones.

15.5 Defectos en la extrusión

Dependiendo de la condición del material de la pieza de trabajo y de las variables del proceso, los productos extruidos pueden desarrollar varios tipos de defectos que pueden afectar significativamente su resistencia y la calidad del producto. Algunos defectos resaltan a simple vista, mientras que otros pueden detectarse sólo mediante las técnicas no

destructivas descritas en la sección 36.10. Existen tres principales *defectos en la extrusión*: agrietamiento superficial, entubamiento y agrietamiento interno.

Agrietamiento superficial. Si la temperatura de extrusión, la fricción o la velocidad son demasiado altas, las temperaturas de la superficie pueden llegar a ser excesivas, lo que puede causar agrietamiento y desgarramiento superficial (*agrietamiento tipo abeto* o *agrietamiento de velocidad*). Estas grietas son intergranulares (a lo largo de los límites de grano; vea la figura 2.27) y, por lo general, son causadas por la **fragilidad en caliente** (sección 1.5.2). Estos defectos se producen especialmente en el aluminio, el magnesio y las aleaciones de zinc, no obstante, pueden evitarse al reducir la temperatura de la palanquilla y la velocidad de la extrusión.

El agrietamiento superficial también puede producirse a temperaturas más bajas y se atribuye a la adherencia periódica de la pieza extruida a lo largo de la superficie del dado. Debido a la similitud de su apariencia con la superficie de un tallo de bambú, se conoce como **defecto de bambú**. La explicación es que, cuando el producto de la extrusión se pega temporalmente a la superficie del dado (vea la figura 15.7.), la presión de extrusión aumenta rápidamente; poco después, el producto se desplaza de nuevo hacia adelante y se libera la presión. El ciclo se repite continuamente produciendo grietas circunferenciales periódicas sobre la superficie.

Entubamiento. En la extrusión, el tipo de patrón de flujo de metal que se muestra en la figura 15.6c tiende a atraer los óxidos superficiales y las impurezas hacia el centro de la palanquilla, en forma muy similar a un embudo. Este defecto se conoce como *defecto de entubamiento*, *tubo de escape* o *cola de pescado*; hasta un tercio de la longitud del producto extruido puede contener este tipo de defecto y tiene que ser cortado como desperdicio. El entubamiento se puede minimizar mediante la modificación del patrón de flujo para que sea más uniforme, por ejemplo, al controlar la fricción y reducir al mínimo los gradientes de temperatura dentro de la pieza. Otro método consiste en maquinarse la superficie de la palanquilla antes de la extrusión, de modo que se eliminen las incrustaciones y las impurezas superficiales, o en tratar químicamente los óxidos superficiales antes de la extrusión.

Agrietamiento interno. El centro del producto extruido puede desarrollar grietas, llamadas *grietas centrales*, *reventones centrales*, *fracturas de punta de flecha* o *grietas tipo “Chevron”* (figura 15.16a). Éstas se atribuyen a un estado de esfuerzo de tensión hidrostática que se desarrolla en la línea central de la zona de deformación en el dado (figura

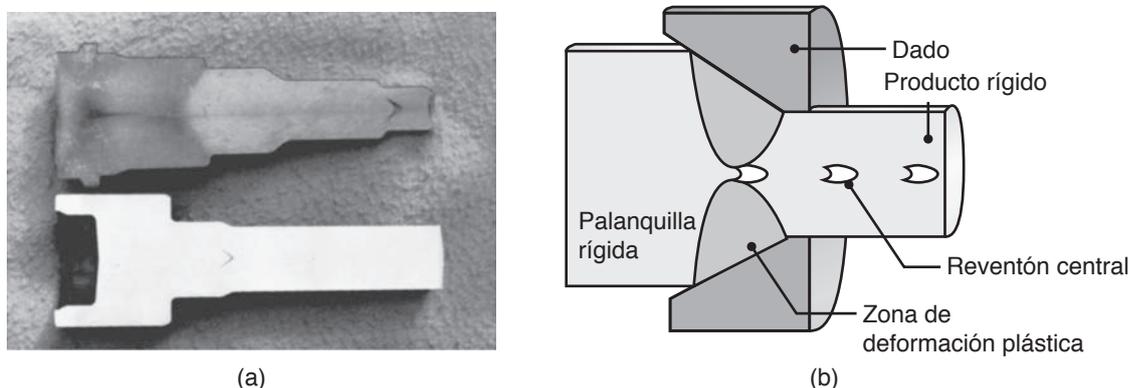


FIGURA 15.16 (a) Agrietamiento tipo “Chevron” (reventón central) en barras redondas de acero extruido; a menos que los productos se inspeccionen, tales defectos pueden quedar sin ser detectados y posteriormente provocar la falla de la pieza durante el servicio; este defecto puede desarrollarse también en el trefilado de barras, alambres y tubos. (b) Ilustración esquemática de las zonas rígidas y plásticas en la extrusión; la tendencia hacia el agrietamiento tipo “Chevron” aumenta si las dos zonas plásticas no se tocan; observe que la zona plástica puede hacerse más grande ya sea al disminuir el ángulo de dado, al aumentar la reducción en la sección transversal o al realizar ambas acciones. Fuente: Según B. Avitzur.

15.16b), una condición similar a la zona con cuello desarrollada en una muestra para pruebas de tensión (vea la figura 2.23). Estas grietas se han observado también en la extrusión de tubos y en el rechazado de tubos (vea las figuras 16.49b y c), apareciendo en las superficies *interiores* de los tubos. La tendencia al agrietamiento central (a) se incrementa con el aumento del ángulo de dado, (b) aumenta al incrementarse la cantidad de impurezas en el material y (c) disminuye al aumentar la relación de extrusión y la fricción.

15.6 Consideraciones de diseño

Con frecuencia, la *extrusión de secciones transversales constantes* es el método más económico empleado para producir una pieza mediante forjado, fundición o maquinado. Aunque el diseñador tiene una gran libertad en cuanto al diseño de secciones transversales, hay varias reglas generales que deben seguirse para simplificar la manufactura y reducir los defectos. Antes de establecer la sección transversal, el diseñador debe considerar lo siguiente:

- En la figura 15.10 se ilustran algunos lineamientos para el diseño adecuado de dados en la extrusión. Note la importancia de (a) la simetría en la sección transversal, (b) evitar las esquinas agudas, (c) mantener un espesor de pared uniforme y (d) evitar cambios severos en las dimensiones del dado dentro de la sección transversal.
- Los perfiles sólidos son los más fáciles de extruir. Cuando sea posible, deben evitarse los perfiles huecos en la sección transversal, pero cuando sean necesarios, las secciones pueden extruirse con dados compuestos, araña o puente, como se ilustra en la figura 15.9.
- Si en la sección transversal existe una dimensión crítica, ésta no debe colocarse en el extremo de un espacio. La figura 15.17 muestra el uso de una banda de metal para disminuir la tolerancia en una dimensión crítica. Observe que este enfoque de diseño requiere la extrusión de una sección transversal hueca; si la sección transversal es compleja, puede extruirse en dos secciones y luego ensamblarse usando las geometrías mostradas en la figura 15.18.
- Por lo general, las extrusiones desarrollarán cierta curvatura, así que posiblemente deban ser enderezadas. Las secciones anchas y delgadas pueden ser difíciles de enderezar; por lo tanto, existe la necesidad de utilizar costillas, como se muestra en la mitad inferior de la figura 15.17.

Las extrusiones por impacto deben incorporar las siguientes consideraciones:

- Las extrusiones por impacto deben ser simétricas con respecto al punzón. Pueden usarse proyecciones externas e internas, siempre y cuando se encuentren en el eje de la pieza.
- La relación máxima de longitud a diámetro no debe exceder un valor aproximado de ocho para evitar una falla del punzón.
- Para la extrusión inversa, el radio exterior puede ser pequeño, pero el radio interior debe ser tan pequeño como sea posible y, preferiblemente, debe incorporar un chaflán.

15.7 Equipos para extrusión

El equipo básico para la extrusión es una *pressa hidráulica horizontal* (figura 15.19; vea también la figura 14.19d). Estas prensas son adecuadas para la extrusión porque permiten controlar la carrera y la velocidad de la operación, además son capaces de aplicar una fuerza constante en una carrera larga. Por consiguiente, se pueden utilizar palanquillas largas para producir extrusiones correspondientemente más largas en cada operación, incrementando así la tasa de producción. Se han construido prensas hidráulicas con una capacidad de fuerza en el martinete de hasta 120 MN (14 000 ton), en particular para la extrusión en caliente de palanquillas de gran diámetro.

Las *prensas hidráulicas verticales* se utilizan normalmente para extrusión en frío y, por lo general, tienen una capacidad inferior a las utilizadas para la extrusión en caliente,

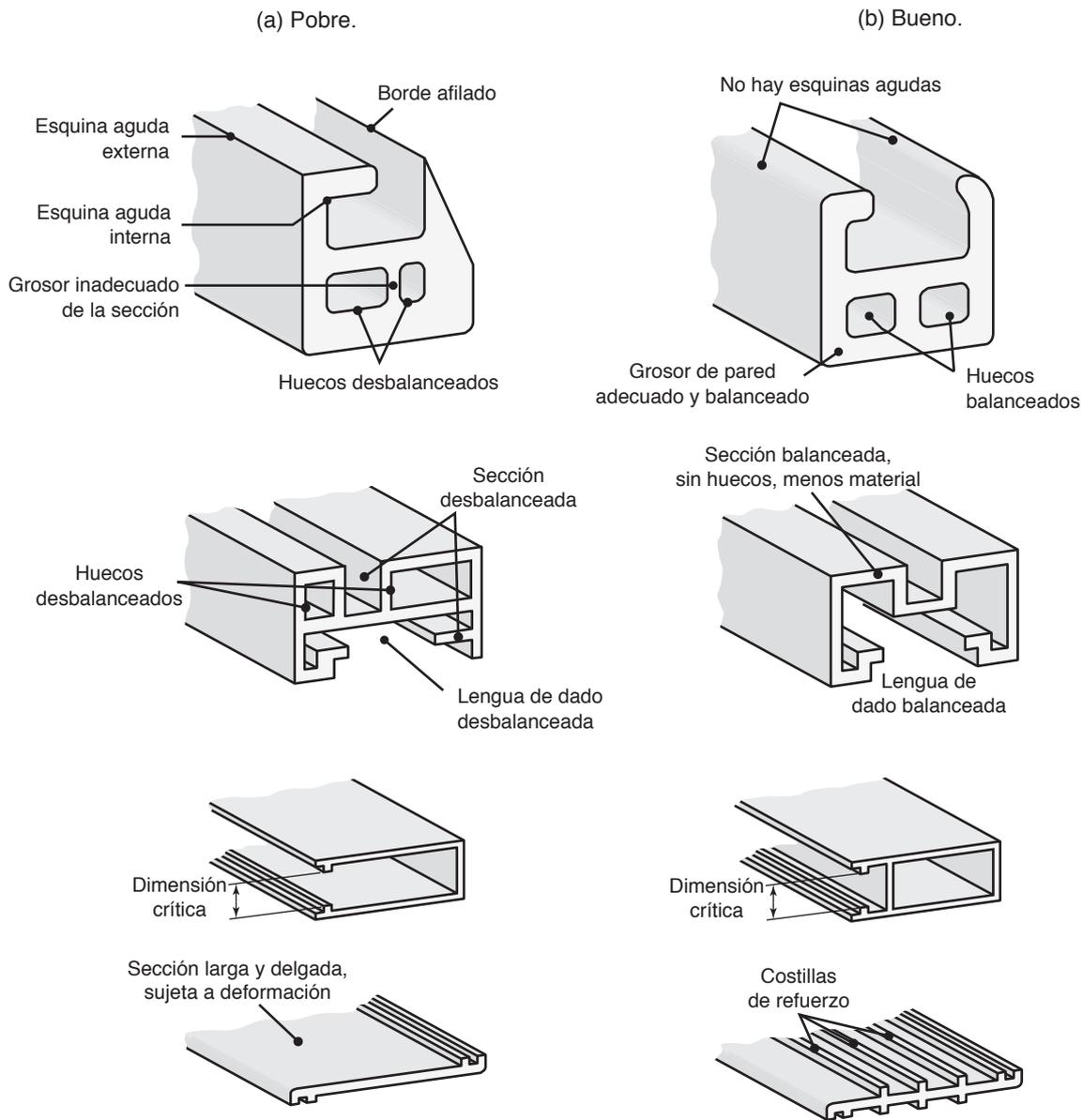


FIGURA 15.17 Ejemplos de prácticas de diseño pobres y buenas para la extrusión; observe la importancia de eliminar las esquinas agudas y mantener una sección de grosor uniforme.

pero ocupan menos espacio de piso. Las prensas mecánicas de *biela-manivela* y de *rótula* (figura 14.19a y b) se utilizan para extrusión en frío y extrusión por impacto con el fin de producir pequeños componentes en masa. Las operaciones de múltiples etapas, donde el área de la sección transversal se reduce en una serie de pasos individuales, se realizan en prensas diseñadas especialmente.

15.8 El proceso de trefilado

En el *trefilado* se reduce o modifica la forma de la sección transversal de una barra o un alambón al jalarlos a través de un dado (de ahí el término trefilado) al que se le llama *dado de trefilado* (figura 15.20). La diferencia entre el trefilado y la extrusión es que, en la extrusión, el material es empujado a través de un dado, mientras que en el trefilado se

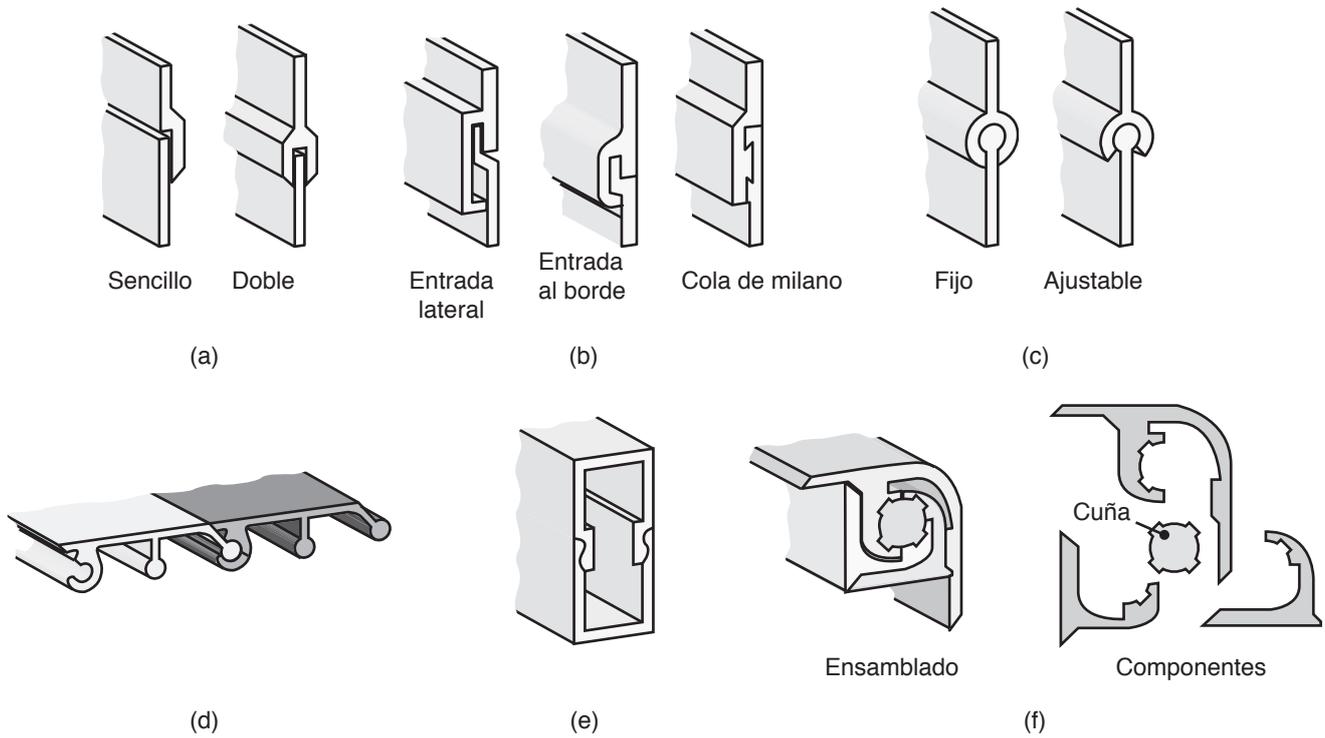


FIGURA 15.18 Ejemplos de geometrías de pieza que permiten el ensamblaje de secciones extruidas. (a) Juntas empalmadas; (b) juntas de empalme aseguradas; (c) ajustes deslizantes cilíndricos; (d) juntas deslizantes cilíndricas aseguradas; (e) ajuste de encaje y (f) ensamble con cuña.

jala el material a través del dado. Los productos de barra y alambroón trefilados cubren una amplia gama de aplicaciones, incluyendo ejes de transmisión de potencia, componentes de máquinas y estructuras, piezas en bruto para pernos y remaches, alambres eléctricos, cables, elementos estructurales cargados en tensión, electrodos de soldadura, resortes, clips para papel, rayos para ruedas de bicicleta y cuerdas para instrumentos musicales.

Las principales variables de procesamiento en el trefilado son similares a las de la extrusión, es decir, reducción en el área de la sección transversal, ángulo de dado, fricción a lo largo de la interfase del dado con la pieza de trabajo y velocidad de trefilado.

Fuerza de trefilado. La expresión para la *fuerza de trefilado*, F , en condiciones *ideales* y *sin fricción* es similar a la de la extrusión y está dada por la ecuación

$$F = Y_{\text{prom}} A_f \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right), \quad (15.4)$$

donde Y_{prom} es el esfuerzo real promedio del material en la región de trabajo en los dados. Puesto que se debe realizar más trabajo para superar la fricción, la fuerza aumenta con el incremento de la fricción. Por otra parte, debido a la deformación no uniforme dentro de la zona del dado, se requiere energía adicional, conocida como *trabajo redundante de deformación*. Aunque se han desarrollado varias ecuaciones a lo largo de los años para estimar la fuerza de trefilado (las cuales se describen con mayor detalle en libros de texto avanzados), una fórmula útil que incluye la fricción y el trabajo redundante es

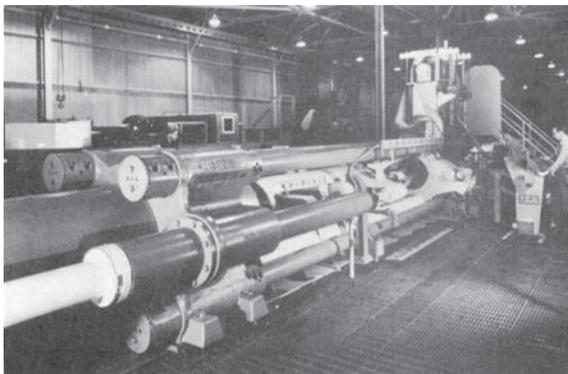


FIGURA 15.19 Vista general de una prensa de extrusión hidráulica de 9 MN (1000 ton). Fuente: Cortesía de Jones & Laughlin Steel Corporation.

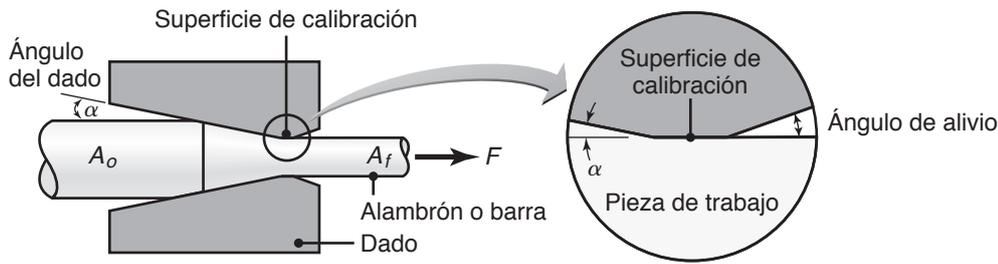


FIGURA 15.20 Variables del proceso durante el trefilado; el ángulo del dado, la reducción del área de la sección transversal por pasada, la velocidad de trefilado, la temperatura y la condición de lubricación afectan la fuerza de trefilado, F .

$$F = Y_{\text{prom}} A_f \left[\left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right) + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (15.5)$$

donde α es el ángulo del dado en radianes.

Como puede verse en las dos ecuaciones anteriores, la fuerza de trefilado aumenta a medida que se incrementa la reducción. Sin embargo, debe haber un límite a la magnitud de la fuerza porque cuando el esfuerzo de tensión alcance el esfuerzo de cedencia del metal trefilado, el alambre simplemente cederá y, finalmente, se romperá. Se puede demostrar que, *idealmente y sin fricción*, la reducción máxima en el área de la sección transversal por pasada es de 63%. Así, por ejemplo, una barra de 10 mm de diámetro puede reducirse hasta un diámetro de 6.1 mm en una sola pasada sin falla.

También puede demostrarse que, para cierta reducción de diámetro y una determinada condición de fricción, existe un *ángulo de dado óptimo* al que la fuerza de trefilado es mínima. Sin embargo, es frecuente que la fuerza del dado no sea la principal preocupación de la calidad del producto, y el ángulo de dado real puede diferir de dicho valor óptimo.

Trefilado de otras formas. Existen varias secciones transversales sólidas que pueden producirse mediante trefilado a través de dados con diferentes perfiles. El diseño adecuado de dados y la selección apropiada de la secuencia de reducción por pasada requieren de considerable experiencia para asegurar el adecuado flujo de material en el dado, reducir el desarrollo de defectos internos o externos y mejorar la calidad superficial.

El grosor de la pared, el diámetro o la forma de los tubos que han sido producidos por extrusión u otros procedimientos descritos en este libro pueden reducirse aún más mediante procesos de *trefilado de tubos* (figura 15.21). Con estas técnicas pueden trefilarse tubos hasta de 0.3 m (12 pulg) de diámetro.

Los *dados en forma de cuña* se utilizan para el trefilado de *tiras planas*. Aunque se utiliza sólo en aplicaciones específicas, el principio detrás de este proceso es el mecanismo de **deformación** fundamental del planchado que se usa ampliamente en la fabricación de latas de aluminio para bebidas, como se muestra en la figura 16.31.

15.9 Práctica del trefilado

Un trefilado exitoso requiere de la selección apropiada de los parámetros del proceso. En el trefilado, las reducciones del área de la sección transversal por pasada llegan aproximadamente hasta 45% y, por lo general, cuanto menor sea la sección transversal inicial, menor será la reducción por pasada. Los alambres finos se trefilan con una reducción de 15 a 25% por pasada y los tamaños más grandes entre 20 y 45%. Las reducciones mayores a 45% pueden resultar en la ruptura del lubricante, lo cual conduce al deterioro del acabado superficial. Aunque la mayor parte del trefilado se realiza a temperatura am-

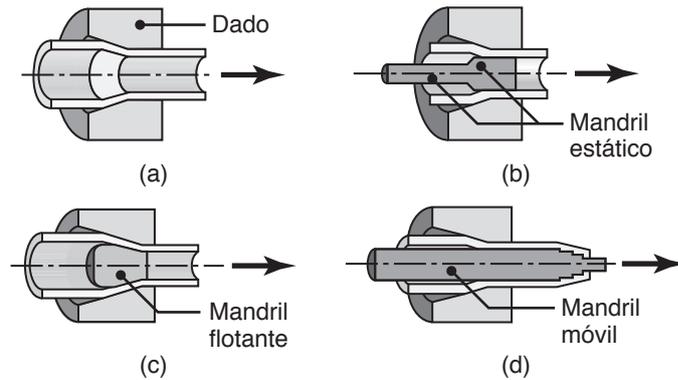


FIGURA 15.21 Ejemplos de operaciones para el trefilado de tubos, con y sin mandril interno; observe que es posible producir una gran variedad de diámetros y grosores de pared a partir del mismo material tubular inicial (el cual se ha fabricado mediante otros procesos).

biente, el trefilado de grandes secciones sólidas o huecas puede realizarse a temperaturas elevadas con el fin de reducir las fuerzas.

En las barras puede realizarse una reducción ligera, conocida como **pase de dimensionamiento**, con el fin de mejorar su acabado superficial y su precisión dimensional. Sin embargo, debido a que básicamente sólo se deforman las capas superficiales, las reducciones ligeras suelen producir una deformación altamente no uniforme del material y su microestructura. Por consiguiente, las propiedades del material pueden variar con la distancia radial que haya dentro de la sección transversal.

En la figura 15.20, observe que la punta de una barra o un alambión debe ser reducida en su sección transversal con el fin de poder ser alimentada a través de la abertura del dado y posteriormente jalada. Esto se hace normalmente mediante el **recalcado rotativo** de la punta de la barra o del alambión, de manera similar a la mostrada en las figuras 14.15a y b, en una operación llamada *punteado*. Las velocidades de trefilado dependen del material y de la reducción del área de la sección transversal, pueden variar desde 1 hasta 2.5 m/s (200 a 500 pies/min) para secciones pesadas hasta 50 m/s (165 pies/s) para alambre muy fino, como el que se usa en los electroimanes. Debido a que el producto no tiene tiempo suficiente para disipar el calor generado en el trefilado, las temperaturas pueden elevarse significativamente con velocidades de trefilado altas y generar efectos perjudiciales sobre la calidad del producto, como el acabado superficial y las tolerancias dimensionales que se asocian con la deformación térmica.

El trefilado de alambres de cobre y latón se designa por medio del *temple* (como 1/4 de dureza, dureza media, etc.) que adquieren durante el trabajo de endurecimiento. Con el propósito de mantener suficiente ductilidad del material durante el trefilado en frío, puede requerirse un recocido intermedio entre pasadas. Los alambres de acero al alto carbono para resortes e instrumentos musicales se hacen mediante **patentado**, una operación de tratamiento térmico realizada sobre el alambre trefilado con el propósito de que se desarrolle una microestructura de perlita fina (vea la figura 4.9). Estos alambres tienen resistencias máximas a la tensión tan altas como 5 GPa (700 ksi), además de una reducción del área en tensión de alrededor de 20 por ciento.

Trefilado múltiple. Aunque es posible hacer alambres muy finos mediante el trefilado, el costo puede ser alto ya que el volumen de metal producido por unidad de tiempo es bajo. Uno de los métodos empleados para aumentar la productividad consiste en trefilar varios alambres al mismo tiempo como en un *manejo*. Las superficies de contacto entre cien o más de estos alambres se mantienen separadas mediante un material metálico adecuado, el cual posee propiedades similares pero de menor resistencia química de modo que, posteriormente, pueda lixiviarse a partir de la superficie de los alambres trefilados.

El trefilado múltiple produce alambres que tienen secciones transversales un tanto poligonales, en vez de redondas. Los alambres producidos pueden tener diámetros tan peque-

ños como de 4 μm (0.00016 pulg) y pueden hacerse de materiales tales como aceros inoxidables, titanio y aleaciones de alta temperatura. Además de la producción de longitudes continuas, se han desarrollado técnicas para producir alambre fino que posteriormente se rompe o corta en varios tamaños y formas. Estos alambres se utilizan en aplicaciones tales como plásticos conductores de electricidad, textiles resistentes al calor y eléctricamente conductores, medios de filtrado, camuflaje de radar e implantes médicos.

Diseño de dados. En la figura 15.22 se muestran los rasgos característicos de un dado típico de trefilado. Observe que en un dado típico hay dos ángulos (de entrada y de acercamiento). Los ángulos de acercamiento suelen oscilar entre 6 y 15°, mientras que los ángulos de entrada suelen ser más grandes. La campana y los ángulos de entrada se utilizan para controlar el suministro de lubricante y el espesor de la película de lubricante. El propósito de la superficie de apoyo (o de calibración) es ajustar el diámetro final del producto (dimensionamiento) y mantener ese diámetro, incluso cuando la superficie de contacto del dado con la pieza de trabajo se desgasta.

Para el **trefilado del perfil**, que implica varias etapas de deformación con el fin de producir el perfil final, se requiere un conjunto de dados. Éstos pueden ser hechos a partir de una sola pieza o, dependiendo de la complejidad del perfil de la sección transversal, con diversos segmentos unidos en un anillo de retención. En el diseño de dados se aplican técnicas de diseño asistido por computadora para suavizar el flujo de material y minimizar la formación de defectos.

En el trefilado de varillas o barras de diversas formas, también puede usarse un juego de cilindros locos o rodillos conformados. Un arreglo de este tipo (llamado *cabeza de turco*) es más versátil que el de los dados de trefilado comunes, debido a que los rodillos pueden ajustarse a diferentes posiciones y ángulos para realizar el trefilado de perfiles específicos.

Materiales para dados. Por lo general, los materiales para fabricar dados de trefilado (tabla 5.8) son aceros y carburos. Para el trefilado en caliente se utilizan dados de acero fundido, por la alta resistencia del acero al desgaste a temperaturas elevadas. Los dados de diamante se utilizan para el trefilado de alambre fino, con diámetros de entre 2 μm y 1.5 mm (0.0001 y 0.06 pulg). Éstos pueden hacerse a partir de un diamante *monocristalino* o en forma *poli cristalina*, con partículas de diamante incrustadas en una matriz de metal llamada *compacta*. Debido a su tenacidad y muy baja resistencia a la tensión, los dados de carburo y diamante se utilizan normalmente como **insertos** o **pastillas**, los cuales se apoyan en una caja de acero (figura 15.23).

Lubricación. La lubricación es un factor esencial en las operaciones de trefilado para mejorar la vida del dado y la superficie del producto acabado, así como para reducir las fuerzas de trefilado y la elevación de la temperatura. La lubricación es crucial, particularmente en el trefilado de tubos, debido a la dificultad de mantener una película lubricante lo suficientemente gruesa en la interfase del mandril con el tubo. En el trefilado de barras, un método común de lubricación utiliza recubrimientos de conversión de fosfato.

Los siguientes son los métodos básicos de lubricación que se utilizan en el trefilado (vea también la sección 33.7):

- **Trefilado húmedo:** los dados y la barra se sumergen completamente en el lubricante.
- **Trefilado en seco:** la superficie de la barra a ser estirada se recubre con un lubricante, pasándola a través de una caja llena de lubricante (*caja de relleno*).
- **Recubrimiento metálico:** la barra o el alambre se recubre con un metal blando, digamos cobre o estaño, que actúa como un lubricante sólido.

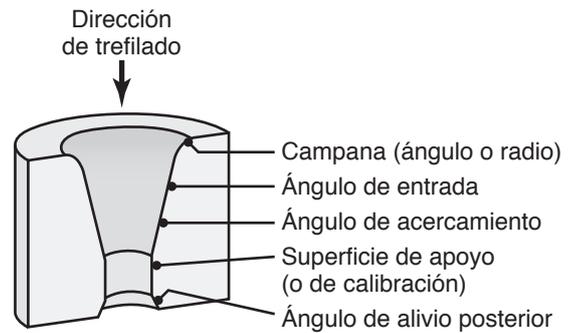


FIGURA 15.22 Terminología relacionada con un dado típico utilizado para trefilar una barra o un alambre redondos.

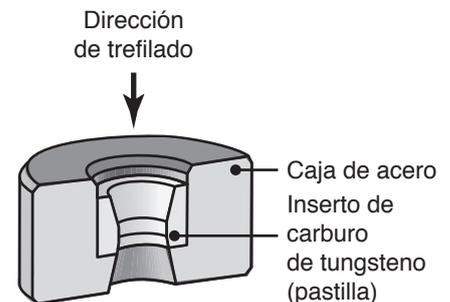


FIGURA 15.23 Dado con inserto de carburo de tungsteno en una caja de acero; los dados de diamante, que se utilizan en el trefilado de alambres delgados, se encajonan de manera similar.

- **Vibración ultrasónica:** las vibraciones de los dados y mandriles mejoran el acabado superficial y la vida del dado; asimismo, reducen las fuerzas de trefilado, lo que permite obtener mayores reducciones por pasada sin incurrir en fallas.

15.10 Defectos y esfuerzos residuales en el trefilado

Los defectos típicos en una barra o alambre trefilados son similares a los observados en la extrusión, especialmente el **agrietamiento central** (vea la figura 15.16). Otro tipo importante de defectos en el trefilado son las **costuras** (o traslapes), que son araños longitudinales o pliegues en el producto trefilado (vea también la sección 33.2). Las costuras pueden abrirse durante las operaciones de formado posteriores, como el recalado, cabeceado, laminado de roscas o la flexión de la barra o del alambre, y causar problemas de control de calidad graves. Otros diversos defectos superficiales, como rayones y marcas de dado, pueden deberse a la selección incorrecta de los parámetros del proceso, a una mala lubricación o al mal estado del dado.

Debido a que se someten a una deformación no uniforme durante el proceso, los productos trefilados en frío suelen tener *esfuerzos residuales*. Para reducciones ligeras, por ejemplo de un porcentaje pequeño, los esfuerzos residuales longitudinales de la superficie son de compresión, mientras que el volumen está en tensión y, por lo tanto, se mejora la vida a la fatiga. Por el contrario, las reducciones más grandes inducen esfuerzos superficiales de tensión, mientras que el volumen está en compresión. Los esfuerzos residuales pueden ser importantes al causar agrietamiento por esfuerzo y corrosión de la pieza a través del tiempo. Por otra parte, ocasionan que el componente se *deforme* si posteriormente se elimina una capa de material (vea la figura 2.30), por ejemplo mediante ranurado, maquinado o esmerilado.

Las barras y los tubos que no son lo suficientemente rectos, o que se suministran en rollo, pueden enderezarse al pasarlos a través de un arreglo de rodillos colocados en diferentes ejes, proceso similar al nivelado de rodillos que se muestra en la figura 13.7b.

15.11 Equipos para trefilado

Aunque está disponible en varios diseños, el equipo de trefilado es básicamente de dos tipos: banco de trefilado y cabrestante.

Un **banco de trefilado** contiene un solo dado y su diseño es similar al de una larga máquina de pruebas a tensión horizontal (figura 15.24). La fuerza de tensión es suministrada por una transmisión de cadena o un cilindro hidráulico. Los bancos de trefilado se utilizan para el trefilado de longitud única de barras y tubos rectos, con diámetros mayores de 20 mm (0.75 pulg) y longitudes de hasta 30 m (100 pies). Las capacidades de la

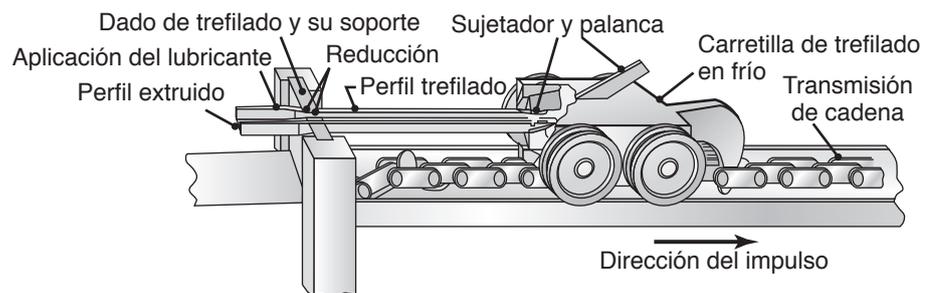


FIGURA 15.24 Trefilado en frío —sobre un banco de trefilado— de un canal extruido para reducir su sección transversal; mediante este procedimiento se trefilan longitudes individuales de barras rectas o de secciones transversales.

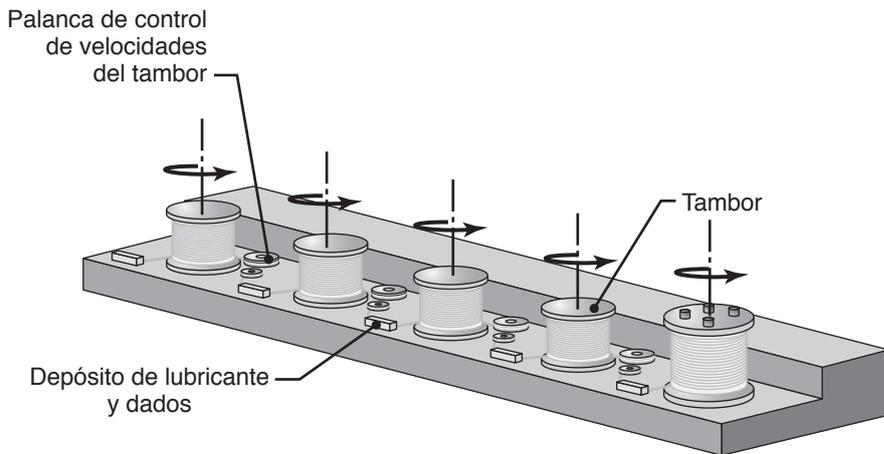


FIGURA 15.25 Ilustración de un trefilado de alambre en varias etapas que se utiliza comúnmente en la producción de hilo de cobre para alambrado eléctrico. Se muestra una configuración de cinco cabrestantes; las máquinas de trefilado pueden incorporar 15 o más de estos tambores, dependiendo del material y del tamaño del alambre. *Fuente:* Según H. Auerswald.

máquina alcanzan 1.3 MN (300 klb) de fuerza de tensión con un rango de velocidad de entre 6 y 60 m/min (20 y 200 pies/min).

Barras y alambres muy largos (varias millas o kilómetros) y alambres con secciones transversales más pequeñas, por lo general menores de 13 mm (0.5 pulg), se trefilan mediante un tambor giratorio (*carrete* o *cabrestante*, figura 15.25). En esta configuración, la tensión proporciona la fuerza necesaria para estirar el alambre, usualmente a través de múltiples dados (trefilado en tándem).

RESUMEN

- La extrusión es el proceso de empujar una palanquilla a través de un dado para reducir su sección transversal o producir diversas secciones transversales sólidas o huecas. Por lo general, este proceso tiene lugar a temperaturas elevadas con el fin de reducir la fuerza de extrusión y mejorar la ductilidad del material.
- Los factores importantes a considerar durante el diseño de dados de extrusión son la relación de extrusión, temperatura de la palanquilla, lubricación y velocidad de extrusión. Aunque el término “extrusión en frío” se aplica a la extrusión a temperatura ambiente, también es el nombre utilizado para cierta combinación de operaciones de extrusión y forjado. La extrusión en frío es capaz de producir económicamente partes discretas en diferentes formas y con buenas propiedades mecánicas y tolerancias dimensionales.
- Las operaciones de trefilado de barras, alambres y tubos implican básicamente jalar el material a través de un dado o un conjunto de dados puestos en tándem. Las secciones transversales de la mayoría de los productos trefilados son redondas, pero también se pueden estirar otras formas. Por lo general, el trefilado de productos tubulares, ya sea para reducir su diámetro o su espesor, requiere el uso de mandriles internos.
- El diseño del dado, la reducción en el área de la sección transversal por pasada y la selección de los materiales del dado y los lubricantes son los parámetros más importantes en la fabricación de productos trefilados de alta calidad y con un buen acabado superficial. Tanto en la extrusión como en el trefilado, se pueden desarrollar defectos externos e internos. Los factores importantes son el ángulo de dado, la reducción por pasada y la calidad del material de la pieza de trabajo.

TÉRMINOS CLAVE

Agrietamiento central	Carrete	Enlatado	Proceso Séjournet
Agrietamiento por velocidad	Dado compuesto (ojo de buey)	Extrusión	Recubrimiento de conversión
Agrietamiento tipo "Chevron"	Dado de araña	Extrusión constante	Relación de extrusión
Agrietamiento tipo abeto	Dado de corte	Extrusión en frío	Traslape (costura)
Alambre	Dado tipo puente	Extrusión hidrostática	Trefilado
Banco de trefilado	Defecto de bambú	Extrusión por impacto	Trefilado múltiple
Barra	Defecto de tubo	Pase de dimensionamiento	Zona muerta de metal
Cabeza de turco	Defectos de extrusión	Patentado	
Cabrestante	Encamisado	Planchado	

BIBLIOGRAFÍA

- Altan, T., Ngaile, G. y Shen, G. (eds.), *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, ASM International, 2004.
- ASM Handbook, Vol. 14A: *Metalworking: Bulk Forming*, ASM International, 2005.
- Bauser, M., Sauer, G. y Siegert, K. (eds.), *Extrusion*, 2a. ed., ASM International, 2006.
- Hosford, W. F. y Caddell, R. M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 4a. ed., Cambridge, 2010.
- Saha, P., *Aluminum Extrusion Technology*, ASM International, 2000.
- Sheppard, T., *Extrusion of Aluminum Alloys*, Springer, 2010.
- Tschaetch, H., *Metal Forming Practice: Processes, Machines, Tools*, Springer, 2007.
- Wright, R. N., *Wire Technology: Process Engineering and Metallurgy*, Butterworth-Heinemann, 2010.

PREGUNTAS DE REPASO

- 15.1** ¿En qué se distingue la extrusión del laminado y del forjado?
- 15.2** Explique la diferencia entre extrusión y trefilado.
- 15.3** ¿Qué es un dado de araña? ¿Cuál es su utilidad?
- 15.4** ¿Por qué a veces los alambres se estiran en manojos?
- 15.5** ¿Qué es una zona muerta de metal?
- 15.6** Defina los términos (a) revestimiento, (b) bloque de relleno, (c) dado de corte, (d) costra y (e) enlatado.
- 15.7** ¿Por qué el vidrio es un buen lubricante para la extrusión en caliente?
- 15.8** ¿Qué tipos de defectos pueden ocurrir en (a) la extrusión y (b) el trefilado?
- 15.9** Describa la diferencia entre la extrusión directa y la inversa.
- 15.10** ¿Qué es la superficie de calibración? ¿Cuál es su función en un dado?
- 15.11** ¿Cómo se extruyen los tubos? ¿También pueden trefilarse? Explique su respuesta.
- 15.12** ¿Es posible extruir engranes rectos? ¿también pueden extruirse engranes helicoidales? Explique sus respuestas.
- 15.13** ¿Cuál es la diferencia entre el entubado y el defecto de bambú?
- 15.14** ¿Qué es la extrusión por impacto?
- 15.15** ¿Qué es el defecto de tubo en la extrusión?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 15.16** Mencione las similitudes y diferencias entre la extrusión directa y el trefilado.
- 15.17** Explique por qué la extrusión es un proceso por lotes o semicontinuo. ¿Cree usted que pueda convertirse en un proceso continuo? Explique su respuesta.
- 15.18** La relación de extrusión, la geometría del dado, la velocidad de extrusión y la temperatura de la palanquilla afectan a la presión de extrusión. Explique por qué.
- 15.19** Explique por qué la extrusión en frío es un proceso de manufactura importante.
- 15.20** ¿Cuál es la función de una placa separadora en la extrusión por impacto?
- 15.21** Explique las diferentes maneras en que el cambio del ángulo de dado afecta el proceso de extrusión.
- 15.22** El vidrio es un buen lubricante para la extrusión en caliente. ¿Utilizaría usted el vidrio también para el forjado con dado impresor? Explique su respuesta.
- 15.23** ¿Cómo haría usted para evitar los defectos de agrietamiento central en la extrusión? Explique por qué sus métodos serían eficaces.
- 15.24** La tabla 15.1 proporciona rangos de temperatura para la extrusión de diversos metales. Describa las posibles consecuencias de la extrusión a una temperatura (a) por debajo y (b) por encima de estos rangos.

15.25 ¿Variará la fuerza en la extrusión directa a medida que la palanquilla se hace más corta? Si es así, ¿por qué?

15.26 Comente sobre el significado de los patrones del flujo de metal que se muestran en la figura 15.6.

15.27 ¿En qué aplicaciones podría usted utilizar el tipo de piezas extruidas por impacto que se muestran en la figura 15.15?

15.28 ¿Cuál es el propósito de la superficie de calibración en un dado de trefilado? ¿Existe un límite en el tamaño de dicha superficie? Explique su respuesta.

15.29 ¿Es posible fabricar engranes rectos por (a) trefilado y (b) extrusión? ¿Y engranes helicoidales? Explique su respuesta.

15.30 ¿Cómo se prepara el extremo de un alambre con el fin de poder alimentarlo a través de un dado para comenzar una operación de trefilado?

15.31 ¿Cuál es el propósito de un bloque de relleno en la extrusión? Explique.

15.32 Describa sus observaciones en relación con la figura 15.9.

15.33 En ocasiones, el trefilado de acero se lleva a cabo dentro de un forro de metal blando, como el cobre o plomo. ¿Cuál es el propósito de este forro?

15.34 Explique las ventajas del trefilado múltiple.

15.35 ¿Bajo qué circunstancias sería preferible la extrusión directa sobre la extrusión inversa?

15.36 ¿Por qué es perjudicial la lubricación en la extrusión con un dado compuesto o del tipo ojo de buey?

15.37 En la extrusión hidrostática, se utilizan sellos complejos entre el martinete y el cilindro, pero no entre la palanquilla y el dado. Explique por qué.

15.38 Describa el propósito de un revestimiento del cilindro en la extrusión directa, como se muestra en la figura 15.1. ¿Cuál es la función del revestimiento en la extrusión inversa?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

15.39 Estime la fuerza requerida en la extrusión de latón 70-30 a 700 °C si el diámetro de la palanquilla es de 200 mm y la relación de extrusión es de 30.

15.40 Suponga un proceso de trefilado ideal, ¿cuál es el diámetro final mínimo al que puede trefilarse una barra de 60 mm de diámetro?

15.41 Si en el problema 15.40 se incluye la fricción, ¿sería diferente el diámetro final? Explique su respuesta.

15.42 Calcule la fuerza de extrusión para una palanquilla redonda de 250 mm de diámetro, hecha de acero inoxidable 304, y extruida a 1000 °C hasta un diámetro de 70 mm.

15.43 La planeación de una operación de extrusión involucra acero a 1000 °C con un diámetro inicial de 100 mm y un diámetro final de 25 mm. Para efectuar la operación se dispone de

dos prensas, una con capacidad de 20 MN y otra con capacidad de 10 MN. ¿La prensa más pequeña es suficiente para esta operación? Si no es así, ¿qué recomendaciones haría usted para permitir el uso de la prensa más pequeña?

15.44 Un alambre redondo hecho de un material perfectamente plástico, con un esfuerzo de cedencia de 30 000 psi, se trefila a partir de un diámetro de 0.1 hasta 0.07 pulg en un dado de trefilado a 15°. Considere que el coeficiente de fricción es 0.15. Usando las ecuaciones (15.4) y (15.5), estime la fuerza de tensión necesaria. Comente sobre las diferencias en su respuesta.

15.45 Suponga que usted es un profesor que cubre los temas descritos en este capítulo y aplicará un examen de los aspectos numéricos para probar la comprensión de sus estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

15.46 Suponga que a este capítulo le falta el resumen. Escriba un resumen de una página sobre los puntos destacados del proceso de trefilado de alambres.

15.47 Revise la literatura técnica y haga una lista detallada de los pasos de manufactura involucrados en la fabricación de agujas hipodérmicas metálicas comunes.

15.48 La figura 15.2 muestra ejemplos de piezas discretas que pueden hacerse mediante el corte de extrusiones en piezas individuales. Mencione otros diversos productos que pueden fabricarse de manera similar.

15.49 Las piezas que se muestran en la figura 15.2 se producen económicamente por extrusión, pero es difícil producirlas de otra manera. Liste los procesos que podrían utilizarse para producir estas piezas y explique por qué no son tan atractivos como la extrusión.

15.50 Investigue en la literatura técnica y explique cómo pueden aplicarse vibraciones externas en una operación de trefila-

do para reducir la fricción. También comente sobre las posibles direcciones de vibración, por ejemplo longitudinal o torsional.

15.51 ¿Cómo haría usted para lograr una extrusión escalonada que tenga secciones transversales crecientes en toda su longitud? ¿Es posible? ¿Su proceso sería económico y adecuado para grandes corridas de producción? Explique su respuesta.

15.52 Liste los procesos que son adecuados para la producción de un tubo de aluminio. Para cada proceso de la lista, haga un bosquejo de la estructura de grano que podría esperarse aparezca en el producto terminado.

15.53 Suponga que usted es el director técnico de las asociaciones comerciales de (a) las extrusoras y (b) las operaciones de trefilado de barra y alambres. Prepare un folleto técnico para los clientes potenciales indicando todas las ventajas de estos procesos.

16

Procesos y equipos para el formado de láminas metálicas

16.1	Introducción	386
16.2	Cizallamiento	387
16.3	Características y formabilidad de la lámina metálica	397
16.4	Pruebas de formabilidad para láminas metálicas	399
16.5	Doblado de láminas, placas y tubos	402
16.6	Doblados diversos y operaciones de formado relacionadas	406
16.7	Embutido profundo	411
16.8	Formado de hule e hidroformado	419
16.9	Rechazado	423
16.10	Formado superplástico	426
16.11	Estampado en caliente	427
16.12	Procesos de formado especializados	428
16.13	Manufactura de estructuras metálicas en forma de panel	433
16.14	Consideraciones de diseño en el formado de láminas metálicas	434
16.15	Equipo para el formado de láminas metálicas	437
16.16	Economía de las operaciones para el formado de láminas metálicas	438

EJEMPLO:

16.1	Cálculo de la fuerza de punzón	390
------	--------------------------------	-----

CASOS DE ESTUDIO:

16.1	Lámina metálica soldada a la medida para aplicaciones automotrices	393
16.2	Manufactura de latas para alimentos y bebidas	418
16.3	Hidroformado de tubo para el soporte de un radiador automotriz	421
16.4	Manufactura de címbalos (platillos)	431

- En este capítulo se describen las características importantes de las láminas metálicas y los procesos de formado que se emplean para producir una amplia variedad de productos.
- El capítulo inicia con una descripción de la operación de cizallamiento para el corte de lámina metálica en piezas en bruto con las formas deseadas (formatos) o para eliminar partes del material, por ejemplo para hacer orificios o ranuras.
- Después sigue un análisis de la formabilidad de la lámina metálica, con especial énfasis en las propiedades específicas de los metales que afectan la formabilidad.
- Posteriormente, el capítulo presenta varias operaciones de doblado de láminas, placas y tubos, así como las operaciones de formado por extensión, formado de hule, rechazado, formado por repujado y formado superplástico.
- Después se describe el embutido profundo, junto con la estirabilidad, en lo que se refiere a la producción de recipientes con paredes delgadas.
- El capítulo termina con un análisis del diseño de piezas de lámina metálica, de las características del equipo y las consideraciones económicas para todas estas operaciones.

Piezas típicas hechas mediante el formado de lámina metálica: carrocerías de automóvil, fuselajes de avión, remolques, muebles de oficina, electrodomésticos, tanques de combustible y utensilios de cocina.

Proceso alternativo: Inyección de metal, termoformado, pultrusión, moldeo por inyección, moldeo por soplado.

16.1 Introducción

Productos hechos de **lámina metálica** están en todo nuestro alrededor. Incluyen una amplia gama de productos industriales y de consumo, como latas de bebidas, utensilios de cocina, gabinetes para archivos, escritorios de metal, electrodomésticos, carrocerías de automóvil, remolques y fuselajes de avión (figura 16.1). El formado de láminas se remonta a alrededor del año 5000 a. C., cuando los utensilios para el hogar y las joyas se hacían a golpe de martillo y estampado de oro, plata y cobre. En comparación con los objetos fabricados por fundición y forjado, las piezas de lámina metálica ofrecen la ventaja de tener formas ligeras y versátiles.

Tal como se describe a lo largo de este capítulo, existen numerosos procesos empleados para la fabricación de piezas de lámina metálica. Los términos **trabajo en prensa** o **formado en prensa** se utilizan comúnmente en la industria para describir estas operaciones, puesto que normalmente se llevan a cabo en *preñas* (descritas en las secciones 14.8 y 16.15) utilizando un conjunto de dados. Una pieza de lámina metálica producida en preñas se denomina **estampado** (por la palabra *estampar*, utilizada por primera vez alrededor del año 1200 d. C y que significa “forzar hacia abajo” o “machacar”). El acero laminado que se usa con mayor frecuencia es el acero al bajo carbono debido a su bajo costo y, en general, buena resistencia



FIGURA 16.1 Ejemplos de piezas de lámina metálica. (a) Piezas estampadas. (b) Piezas producidas mediante rechazado. Fuente: Cortesía de Williamsburg Metal Spinning & Stamping Corp.

y buenas características de formabilidad. Aleaciones desarrolladas más recientemente, como los aceros TRIP y TWIP (vea la sección 5.5.6), se han vuelto más comunes para las aplicaciones automotrices debido a su alta resistencia. También son muy adecuados para proporcionar una buena protección contra los choques en un diseño ligero. El aluminio es el material más común utilizado en aplicaciones como latas para bebidas, envases, utensilios de cocina y donde la resistencia a la corrosión es un factor importante. Los materiales metálicos comunes para aviones y aplicaciones aeroespaciales son aluminio y titanio, aunque están siendo reemplazados cada vez más con materiales compósitos, como se describe en los capítulos 9 y 19.

La mayoría de los procesos de manufactura que implican lámina metálica se realizan a temperatura ambiente. El estampado en caliente se realiza en algunas ocasiones con el fin de aumentar la capacidad de conformación y disminuir las cargas de formado sobre la maquinaria. Las láminas metálicas típicas utilizadas en las operaciones de estampado en caliente son de aleaciones de titanio y diversos aceros de alta resistencia.

En este capítulo se describen, en primer lugar, los métodos por los cuales se cortan piezas en bruto a partir de grandes hojas laminadas para después transformarlas en las formas deseadas. El capítulo también incluye análisis sobre los rasgos característicos de las láminas metálicas, las técnicas empleadas para determinar su capacidad de formado y la construcción de diagramas de límite de formado (FLD, por sus siglas en inglés). También se describen los principales procesos y el equipo que se utiliza para el formado de láminas, como se indica en la tabla 16.1.

16.2 Cizallamiento

Todas las operaciones de formado de lámina metálica comienzan con una **pieza en bruto** de dimensiones adecuadas y obtenida a partir de una lámina grande (por lo general de un *rollo*) mediante **cizallamiento**. El cizallamiento somete a la lámina a esfuerzos cortantes utilizando, por lo general, un punzón y un dado (o matriz) (figura 16.2a). Las características típicas de los bordes cortados de la lámina de metal y de la pieza de material se muestran en las figuras 16.2b y c, respectivamente. Observe que, en este ejemplo, los bordes no son suaves ni perpendiculares al plano de la lámina.

Por lo general, el cizallamiento comienza con la formación de grietas en los bordes superior e inferior de la pieza de trabajo, en los puntos *A* y *B*, y *C* y *D* de la figura 16.2a. Estas grietas finalmente se encuentran y ocurre la separación completa. Las *superficies de fractura* ásperas se deben a las grietas; las *superficies bruñidas* lisas y brillantes que se aprecian en el orificio y la pieza de material provienen del contacto y del rozamiento entre el borde cortado y las paredes del punzón y del dado, respectivamente.

TABLA 16.1

Características generales de los procesos de formado de lámina metálica (en orden alfabético)

Proceso de formado	Características
Embutido	Piezas superficiales o profundas con formas relativamente simples, altas tasas de producción, altos costos de herramientas y equipo.
Estampado	Incluye una amplia variedad de operaciones como punzonado, troquelado, estampado, doblado, bordeado y acuñado; formas simples o complejas formadas a altas velocidades de producción, los costos de la herramienta y del equipo pueden ser altos, pero el costo de mano de obra es bajo.
Explosivo	Láminas grandes con formas relativamente simples, bajos costos de la herramienta pero alto costo de la mano de obra, producción en baja cantidad, tiempos de ciclo largos.
Extensión	Piezas grandes con contornos poco profundos, producción en baja cantidad, altos costos de mano de obra, los costos de la herramienta y el material aumentan con el tamaño de la lámina.
Incremental	Formas de simples a moderadamente complejas con un buen acabado superficial; bajas tasas de producción, pero no requiere herramientas especializadas; materiales limitados.
Hule	Embutido y realzado de formas simples o relativamente complejas, superficie de la lámina protegida por membranas de hule, flexibilidad de operación, bajos costos de las herramientas.
Laminado	Piezas largas con secciones transversales constantes simples o complejas, buen acabado superficial, altas tasas de producción, altos costos de las herramientas.
Pulso magnético	Formado superficial, combamiento y operaciones de estampado en relieve sobre láminas con resistencia relativamente baja, requiere herramientas especiales.
Repujado	Contornos superficiales en láminas grandes, flexibilidad de operación, costos de equipo generalmente altos, el proceso también se usa para enderezar piezas formadas.
Rechazado	Piezas axisimétricas pequeñas o grandes; buen acabado superficial, bajos costos de las herramientas, aunque los costos de mano de obra pueden ser altos a menos que las operaciones estén automatizadas.
Superplástico	Formas complejas, detalles precisos y tolerancias dimensionales estrechas, tiempos de formado de larga duración (por lo tanto, las tasas de producción son bajas), las piezas no son aptas para su uso a altas temperaturas.

Los principales parámetros de procesamiento en el cizallamiento son:

- La forma del punzón y del dado o matriz.
- La holgura, c , entre el punzón y la matriz.
- La velocidad del punzón.
- Lubricación.

La **holgura** es un factor importante en la determinación de la forma y calidad del borde cortado. A medida que aumenta la holgura, la zona de deformación (figura 16.3a) se hace más grande y la superficie del borde cortado se vuelve más áspera. Con holguras excesivas, la lámina tiende a ser jalada hacia la cavidad del dado y el perímetro o los bordes de la zona cortada se vuelven más ásperos. A menos que tales bordes sean aceptables así como se producen, pueden requerirse operaciones secundarias para hacerlos más lisos, lo que aumentará el costo de producción (vea también *troquelado fino* en la sección 16.2.1).

La calidad del borde puede mejorarse al aumentar la velocidad del punzón, que puede ser hasta de entre 10 y 12 m/s (30 y 40 pies/s). Como se muestra en la figura 16.3b, los bordes cortados pueden someterse a un severo trabajo en frío debido a las altas deformaciones de corte involucradas. Entonces, el endurecimiento por trabajo de los bordes reduce su ductilidad, lo que afecta negativamente la formabilidad de la lámina durante las operaciones de formado subsiguientes, como el doblado y la extensión.

La relación del área bruñida sobre las áreas ásperas a lo largo del borde cortado aumenta con el aumento de la ductilidad de la lámina metálica y disminuye con el aumento del espesor de la lámina y de la holgura. La extensión de la zona de deformación, que se muestra en la figura 16.3, depende de la velocidad del punzón. Con el aumento de la ve-

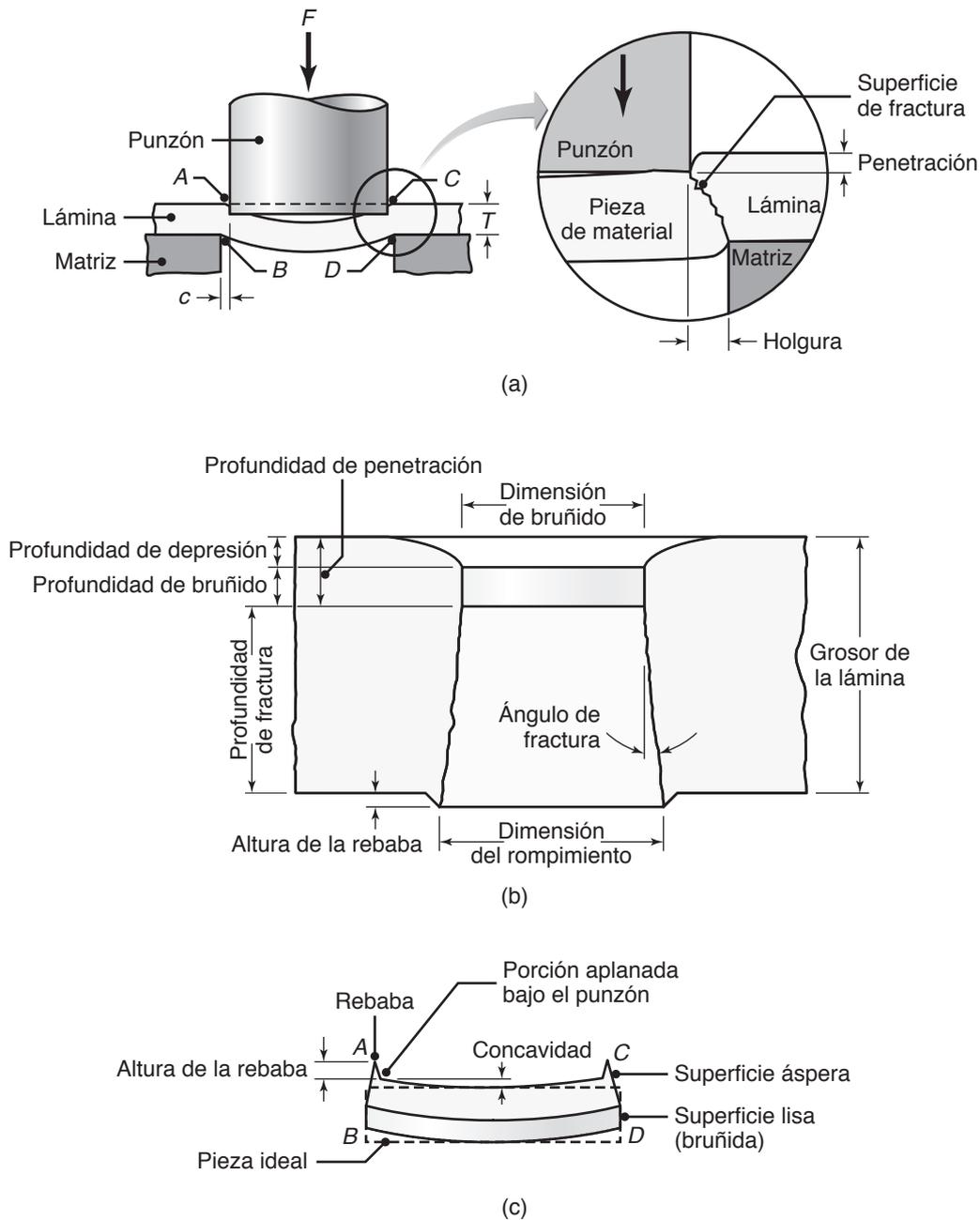


FIGURA 16.2 (a) Ilustración esquemática del cizallamiento con un punzón y una matriz o dado para indicar algunas de las variables del proceso. Rasgos característicos de (b) un orificio punzonado y (c) la pieza de material; note que las escalas de (b) y (c) son diferentes.

locidad, el calor generado por la deformación plástica llega a confinarse en una zona cada vez más pequeña. Por consiguiente, la zona cortada se hace más estrecha y la superficie cortada es más suave y presenta menor formación de rebaba.

Una **rebaba** es un borde o cresta delgada, como se muestra en las figuras 16.2b y c. La altura de la rebaba se incrementa al aumentar la holgura y la ductilidad de la lámina metálica. Los filos mellados de las herramientas contribuyen en gran medida a la formación de grandes rebabas. La altura, la forma y el tamaño de la rebaba pueden afectar significativamente las operaciones de formado subsiguientes. En la sección 26.8 se describen varios procesos de **desbarbado**.

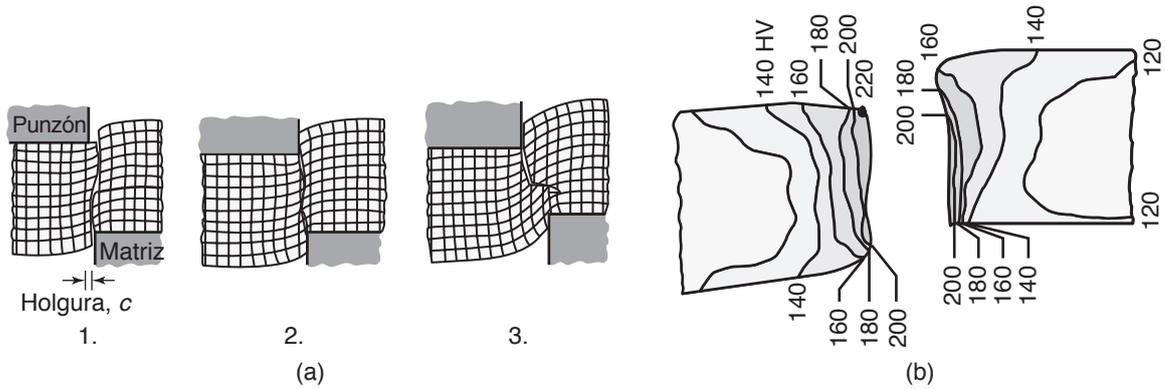


FIGURA 16.3 (a) Efecto de la holgura, c , entre el punzón y la matriz en la zona de deformación por cizallamiento; al aumentar la holgura, el material tiende a ser jalado hacia la matriz en lugar de ser cizallado. En la práctica, las holguras suelen oscilar entre 2 y 10% del grosor de la lámina. (b) Contornos de microdureza (HV) para un acero AISI 1020 laminado en caliente de 6.4 mm (0.25 pulg) de espesor en la zona cortada. Fuente: Según H. P. Weaver y K. J. Weinmann.

Fuerza de punzón. La fuerza necesaria para punzonar una pieza en bruto es básicamente el producto de la resistencia cortante de la lámina metálica por la superficie total a ser cortada. La *fuerza de punzón máxima*, F , puede estimarse a partir de la ecuación

$$F = 0.7TL(UTS), \tag{16.1}$$

donde T es el espesor de la lámina, L es la longitud total cortada (como el perímetro de un orificio) y UTS es la resistencia máxima a la tensión del material. Se ha observado que a medida que aumenta la holgura, disminuye la fuerza del punzón, y el desgaste de matrices y punzones también se reduce. (Los efectos de las formas del punzón y de la matriz sobre las fuerzas de punzón se describen en la sección 16.2.3).

La fricción entre el punzón y la pieza de trabajo aumenta la fuerza de punzón en forma significativa. Por otra parte, se requiere una fuerza para separar el punzón de la lámina durante su carrera de retorno. Esta fuerza, que tiene una dirección opuesta a la del punzón, es difícil de estimar debido a los diversos factores que intervienen en la operación de punzonado.

EJEMPLO 16.1 Cálculo de la fuerza de punzón

Dado: Un orificio de 1 pulg (25 mm) de diámetro debe punzonarse a través de una lámina de una aleación de titanio recocido Ti-6Al-4V, de $\frac{1}{8}$ pulg (3.2 mm) de espesor, a temperatura ambiente.

Se solicita: Estimar la fuerza requerida.

Respuesta: La fuerza se estima a partir de la ecuación (16.1), donde la UTS para esta aleación es de 140 000 psi (1000 MPa), de acuerdo con la tabla 6.10.

Por lo tanto:

$$F = 0.7 \left(\frac{1}{8} \right) (\pi)(1)(140\ 000) = 38\ 500\ \text{lb}$$

$$= 19.25\ \text{tons} = 0.17\ \text{MN}.$$

16.2.1 Operaciones de cizallamiento

Las operaciones de cizallamiento más comunes son el **punzonado** [donde el trozo cortado es desperdicio (figura 16.4a) o puede utilizarse para otros fines como merma] y el **troque-**

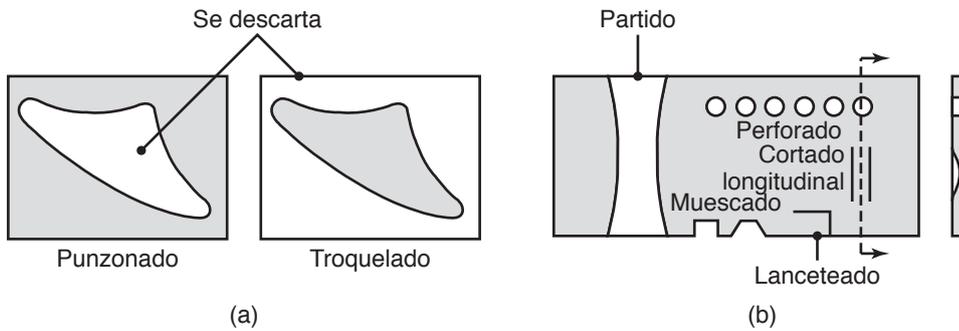


FIGURA 16.4 (a) Punzonado (perforación) y troquelado. (b) Ejemplos de diversas operaciones de troquelado sobre láminas metálicas; el lanceteado implica ranurar un corte longitudinal y doblar la lámina para formar una lengüeta o ceja.

lado (donde el trozo cortado es la parte que se utilizará y el resto es desperdicio).* Las operaciones de cizallamiento que se describen a continuación, así como las descritas en el resto de este capítulo, suelen realizarse en máquinas de control numérico por computadora con portaherramientas de cambio rápido (vea la sección 16.15).

Troquelado. Ésta es una operación de cizallamiento que consta de los siguientes procesos básicos, como se muestra en la figura 16.4b:

- *Perforado*: punzonar un número de orificios en una lámina.
- *Partido*: cortar la lámina en dos o más piezas.
- *Muescado*: eliminar piezas de los bordes.
- *Lanceteado*: producir una lengüeta sin eliminar ningún material.

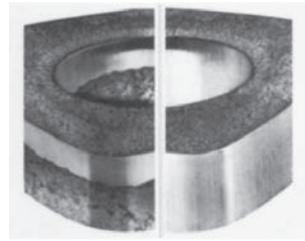
Las piezas producidas mediante estos procesos tienen diversos usos, particularmente en conjunto con otros componentes de lámina metálica. Por ejemplo, láminas de metal perforadas, con diámetros de los agujeros que van desde 1 mm (0.040 pulg) hasta 75 mm (3 pulg) tienen usos como filtros, como pantallas, en la ventilación, como guardas para maquinaria, para la reducción de ruido y en la reducción del peso de piezas y estructuras fabricadas. Éstas se perforan en prensas de biela-manivela (vea la figura 14.19a), a tasas tan altas como 300 000 agujeros por minuto, utilizando dados y equipos especiales.

Troquelado fino. Los bordes cuadrados con superficies cortadas muy lisas pueden producirse por *troquelado fino* (figura 16.5a). En la figura 16.5b se muestra un diseño de troqueles básico. Un agujón o anillo de bloqueo en forma de V bloquea mecánicamente la lámina firmemente en su lugar y, por lo tanto, evita el tipo de distorsión del material mostrado en las figuras 16.2b y 16.3. El proceso de troquelado fino implica una holgura del orden de 1% del espesor de la lámina, holgura que puede oscilar entre 0.5 y 13 mm (0.02 y 0.5 pulg) en la mayoría de las aplicaciones. Por lo general, las tolerancias dimensionales son del orden de ± 0.05 mm (0.002 pulg).

Cortado longitudinal. Las operaciones de cizallamiento se pueden llevar a cabo por medio de un par de cuchillas circulares, similares a las de un abridor de lata (figura 16.6). En el *cortado longitudinal*, las cuchillas siguen una línea recta, una trayectoria circular o una trayectoria curva. Un borde de un corte longitudinal normalmente tiene una rebaba, la cual puede ser plegada sobre la superficie de la hoja al laminarla (aplanarla) entre dos rodillos. Si no se realizan adecuadamente, las operaciones de cortado longitudinal pueden causar diversas distorsiones de los bordes cortados.

Reglas de acero. Los metales blandos, así como el papel, cuero y hule, pueden recortarse con un troquel *de regla de acero*. Este troquel consiste en una tira delgada de acero

* (Nota del revisor técnico). Al trozo de material obtenido por la operación de troquelado se le conoce normalmente como "formato" en la industria metalmeccánica. En lo sucesivo se usará este término en este contexto.



(a)

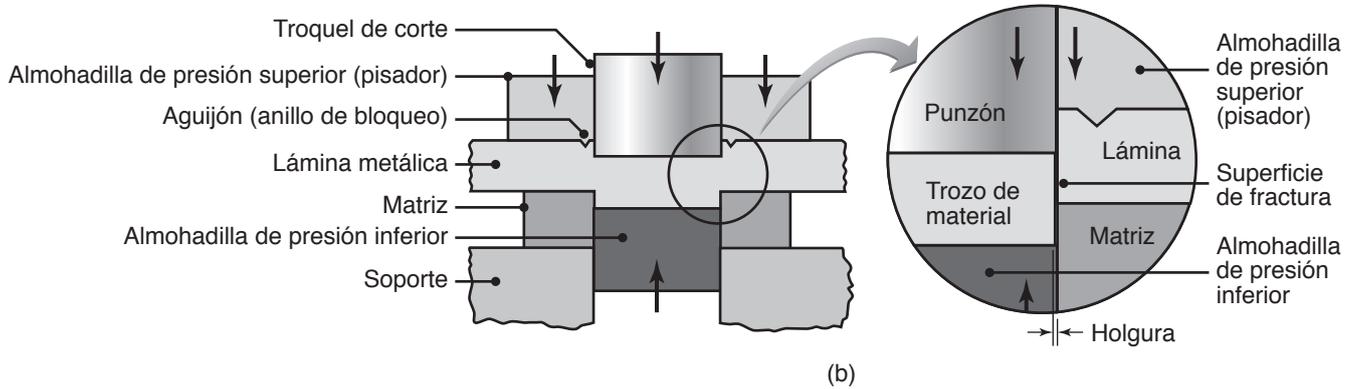


FIGURA 16.5 (a) Comparación de bordes cortados producidos por técnicas convencionales (izquierda) y de troquelado fino (derecha). (b) Ilustración esquemática de una preparación para troquelado fino. Fuente: Reproducido con autorización de Feintool U.S. Operations.

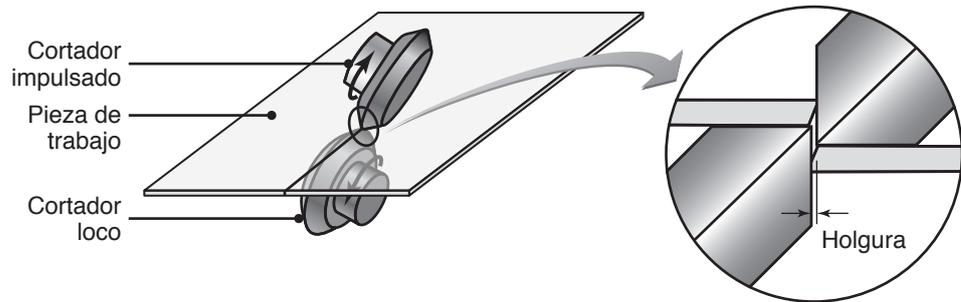


FIGURA 16.6 Cortado longitudinal con cuchillas giratorias, un proceso similar a la apertura de latas.

endurecido doblada en la forma en que será producida y se mantiene en su borde sobre una madera plana o una base de polímero. El troquel es presionado contra la lámina, que se apoya en la superficie plana, y la lámina se corta a lo largo de la forma definida por la regla de acero.

Niblado. En el *niblado*, una máquina llamada nibladora mueve rápidamente un pequeño punzón hacia arriba y hacia abajo dentro de una matriz. Una lámina es alimentada a través de una separación en la matriz y se hacen varios orificios superpuestos. Con control manual o automático, las láminas se pueden cortar a lo largo de cualquier trayectoria deseada. Además de su flexibilidad, una ventaja del niblado es que intrincadas ranuras y muescas, como las mostradas en la figura 16.4b, se pueden producir utilizando punzones estándar. Debido a que no se requieren dados especiales, el proceso es económico para corridas de producción pequeñas.

Desecho (o mermas) en las operaciones de cizallado. La cantidad de *desecho (pérdida en el corte)* que se produce en las operaciones de cizallamiento puede ser significativa y tan alta como el 30% en las piezas estampadas grandes (vea la tabla 40.3). El desecho, que puede ser un factor significativo en los costos de manufactura, se puede reducir en forma sustancial mediante la disposición eficiente de las formas o formatos sobre la lámina que se va a cortar (**anidado**, vea la figura 16.59). Existen técnicas de diseño asistido por computadora para minimizar los desechos.

16.2.2 Formatos soldados a la medida

En los procesos de formado de láminas metálicas que se describen en este capítulo, el formato suele ser una lámina de una sola pieza de espesor constante y cortada (troquelada) a partir de una lámina grande. Una variación importante de esta práctica implica el uso del *rayo láser para soldadura a tope* (vea la sección 30.7) de dos o más formatos de lámina metálica con diferentes formas y grosores. Las tiras se sueldan para obtener una lámina más gruesa localmente o para añadir un material diferente (vea el caso de estudio 16.1).

La correcta alineación de las láminas antes de la soldadura es importante debido a los pequeños espesores involucrados. El conjunto soldado se ensambla posteriormente en una forma final. Esta técnica se ha vuelto cada vez más importante, sobre todo para la industria automotriz. En virtud de que hoy en día cada pieza puede tener un espesor, una composición, un recubrimiento u otras características diferentes, el uso de formatos soldados a la medida tiene las siguientes ventajas:

- Reducción de desechos.
- Eliminación de la necesidad de realizar operaciones posteriores de soldadura por puntos (como en la fabricación de una carrocería de automóvil; vea la figura I.9).
- Mejor control de las dimensiones.
- Aumento de la productividad.

CASO DE ESTUDIO 16.1 Lámina metálica soldada a la medida para aplicaciones automotrices

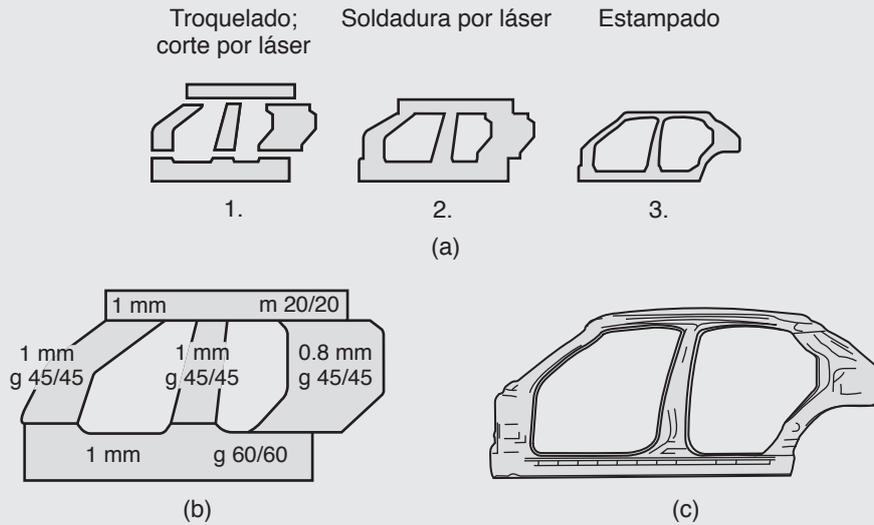
En la figura 16.7 se muestra un ejemplo de la utilización de láminas metálicas soldadas a la medida en carrocerías de automóvil. Note que al principio se cortan cinco formatos diferentes, incluyendo el corte por rayo láser. Cuatro de estas piezas tienen 1 mm de espesor y el grosor de la otra es de 0.8 mm. Las piezas se sueldan a tope con láser (sección 30.7) y se estampan hasta darles su forma final. De esta manera, los formatos se pueden adaptar a una aplicación particular no sólo en cuanto a la forma y al grosor, sino también mediante el uso de láminas de diferente calidad y con o sin recubrimientos.

Las técnicas de soldadura por láser están muy desarrolladas y las articulaciones son muy fuertes y confiables. La combinación de soldadura y piezas de lámina metálica para formado hace posible una gran flexibilidad en el diseño del producto, la formabilidad, la rigidez estructural y el comportamiento en caso de choque de un automóvil. También hace posible el uso de diferentes materiales en un solo producto, ahorra peso y reduce los costos por compra de material, por desecho, ensamble, uso de equipos y mano de obra.

Los diversos componentes mostrados en la figura 16.8 aprovechan las ventajas antes mencionadas. Por ejemplo, observe en la figura 16.8b que la resistencia y la rigidez necesarias para dar soporte al amortiguador se logran por medio de la soldadura de una pieza circular sobre la superficie de una lámina de gran tamaño. En tales componentes, el espesor de la lámina varía (dependiendo de su ubicación y contribución a características como la rigidez y resistencia), lo que resulta en un ahorro significativo en peso sin pérdida de resistencia estructural y rigidez.

Los avances más recientes incluyen el uso de *soldadura por fricción y agitación* (sección 31.4), para producir el formato soldado a la medida, y la producción de *bobinas soldadas a la medida*, en las que el material y/o el espesor pueden variarse en una ubicación dada de la lámina. Los formatos soldados a la medida también se han utilizado en el estampado en caliente de pilares para bastidores automotrices (sección 16.11). En esta aplicación, se utiliza un grado de acero para minimizar las deflexiones y proteger a los ocupantes, también se usa un acero más dúctil que absorbe la energía (vea *tenacidad*, secciones 2.2.4 y 2.10) en los puntos donde el pilar se une al bastidor de la cabina.

(continúa)



Leyenda:

- g 60/60 (45/45) Lámina de acero aleado galvanizado en caliente. Cantidad de zinc: 60/60 (45/45) g/m².
- m 20/20 Lámina de acero electrodepositada con doble capa de una aleación de hierro-zinc. Cantidad de zinc 20/20 g/m².

FIGURA 16.7 Producción de un panel lateral exterior para una carrocería de automóvil mediante soldadura a tope con láser y estampado. Fuente: Según M. Geiger y T. Nakagawa.

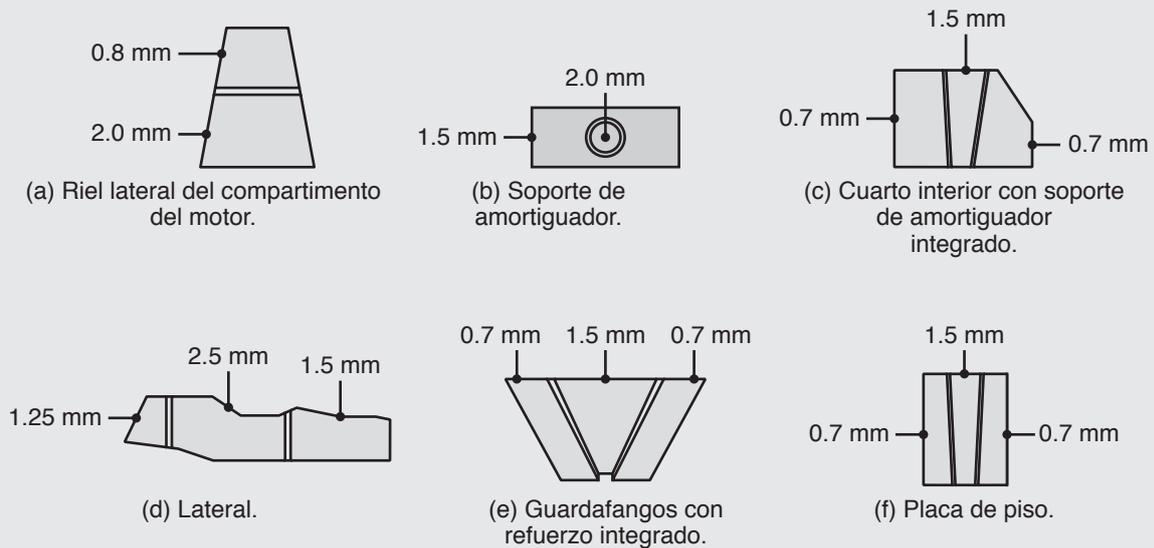


FIGURA 16.8 Ejemplos de componentes de una carrocería automotriz estampados y soldados a tope con láser. Fuente: Según M. Geiger y T. Nakagawa.

16.2.3 Características y tipos de matrices de corte

Holgura. Debido a que la formabilidad de la pieza cortada puede verse influida por la calidad de sus bordes cortados, el control de la holgura es importante. La distancia adecuada depende de:

- El tipo de material y su templado.
- El espesor y el tamaño del formato.
- La proximidad de los bordes a otras orillas cortadas o a los bordes del formato.

Por lo general, las holguras oscilan entre 2 y 8% del espesor de la lámina, aunque pueden ser tan pequeñas como 1% (por ejemplo en el *troquelado fino*, sección 16.2.1) o tan grandes como 30%. Cuanto menor sea la holgura, mejor será la calidad del borde. Si el borde cortado es áspero y no aceptable, puede someterse a un proceso de **rasurado** (figura 16.9a) mediante el cual se recorta por cizallamiento el material sobrante en el borde, como también se muestra en la figura 21.3.

Como lineamiento general, (a) las holguras para materiales blandos son menores que las de grados más duros; (b) cuanto más gruesa sea la lámina, mayor debe ser la holgura, y (c) a medida que disminuye la relación del diámetro del orificio al espesor de la lámina, las holguras deben ser más grandes. Al utilizar holguras más grandes, se debe prestar atención a la rigidez y a la alineación de las prensas, los troqueles y a sus configuraciones.

Forma del punzón y de la matriz. Observe en la figura 16.2a que las superficies del punzón y de la matriz son planas. Debido a que todo el grosor se corta al mismo tiempo, la fuerza del punzón se incrementa rápidamente durante el cizallamiento. La ubicación de las regiones que se están cortando en cualquier instante particular puede controlarse al *biselar* las superficies del punzón y de la matriz (figura 16.10). Esta forma es similar a la de algunas perforadoras de papel y puede observarse al inspeccionar la punta del punzón. El biselado resulta especialmente adecuado para cortar láminas gruesas, ya que reduce la fuerza al inicio de la carrera y el nivel de ruido de la operación.

En la figura 16.10c, observe que la punta del punzón es simétrica y, en la figura 16.10d, que la matriz es simétrica, así que no hay fuerzas laterales que actúen en el punzón para provocar distorsiones. Por el contrario, el punzón de la figura 16.10b tiene un solo ahusamiento y, por lo tanto, está sometido a una fuerza lateral. En consecuencia, las configuraciones del punzón y de la prensa deben tener suficiente rigidez lateral de modo que no produzcan un agujero localizado incorrectamente ni permitan que el punzón golpee el borde de la matriz inferior y le cause daño (como podría hacerlo en los puntos B o D de la figura 16.2a).

Troqueles compuestos. En una carrera, pueden realizarse diversas operaciones sobre la misma lámina y en una sola estación usando un *troquel compuesto* (figura 16.11). Por lo general, tales operaciones combinadas se limitan a formas relativamente simples porque (a) el proceso es algo lento y (b) los troqueles se vuelven rápidamente mucho más caros de producir, en especial los que son complejos, en relación con los que se utilizan en operaciones individuales de corte.

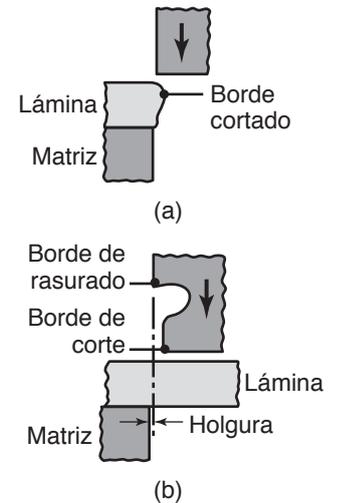


FIGURA 16.9 Ilustraciones esquemáticas del proceso de rasurado. (a) Rasurado de un borde cortado. (b) Combinación de corte y rasurado en una sola carrera.

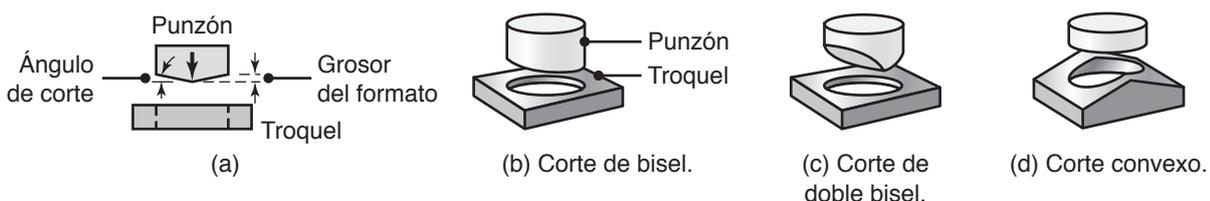


FIGURA 16.10 Ejemplos de ángulos de corte en punzones y matrices.

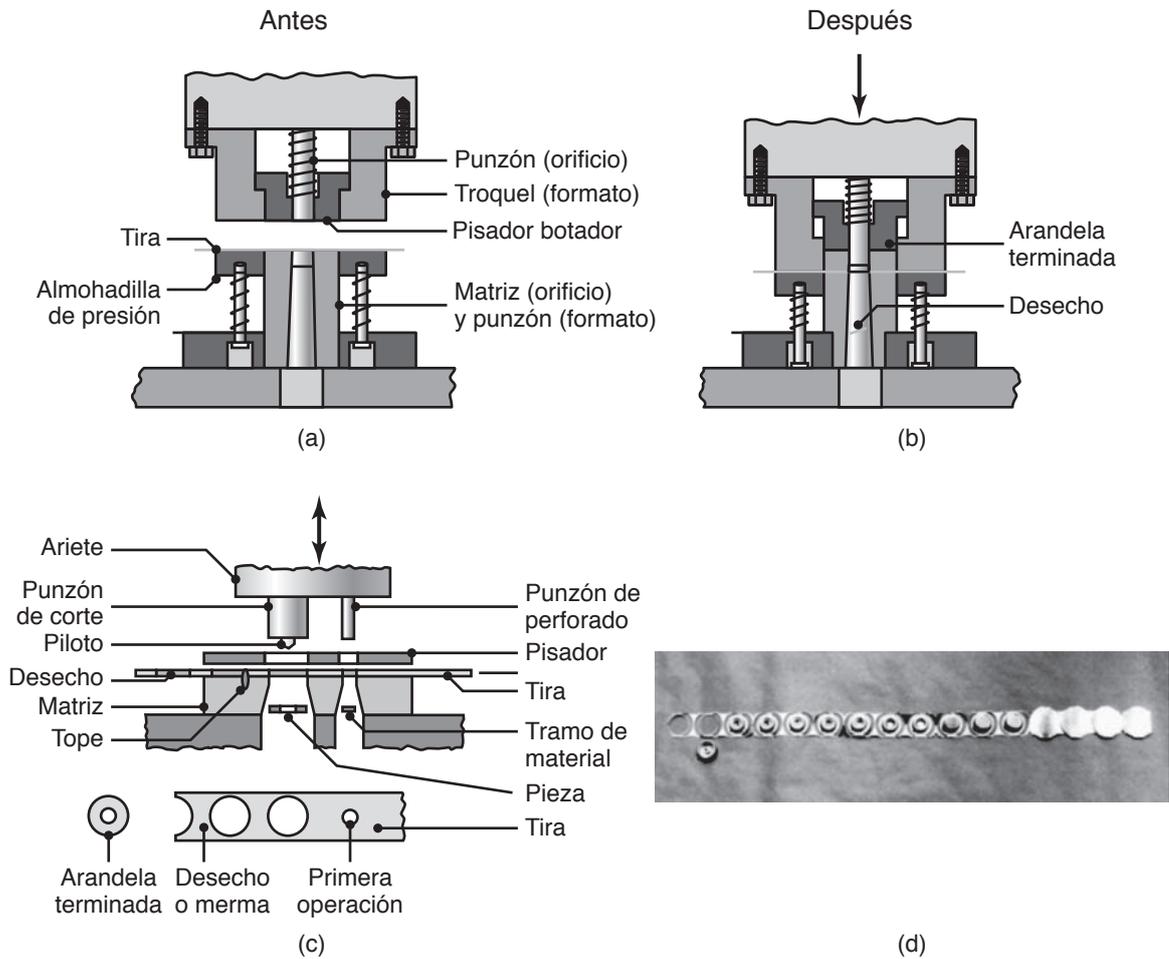


FIGURA 16.11 Ilustraciones esquemáticas (a) antes y (b) después del troquelado de una arandela común en un troquel compuesto; observe los movimientos independientes del troquel (para hacer el corte) y el punzón (para realizar el orificio en la arandela). (c) Ilustración esquemática de la fabricación de una arandela en un troquel progresivo. (d) Formado de la pieza superior de una lata de aerosol en un troquel progresivo; la pieza permanece unida a la tira hasta que se ha completado la última operación.

Troqueles progresivos. Las piezas que requieren múltiples operaciones de formado pueden hacerse, a altas tasas de producción, utilizando *troqueles progresivos*. La lámina de metal se alimenta como una tira embobinada, o banda, y se realiza una operación diferente (como punzonado, troquelado y muescado) en la misma estación de la máquina, donde cada carrera utiliza una serie de punzones (figura 16.11c). En la figura 16.11d se muestra un ejemplo de una pieza hecha en troqueles progresivos. La pieza es el pequeño pedazo redondo de metal que soporta la punta plástica en las latas de aerosol.

Troqueles de transferencia. En una configuración de *troqueles de transferencia*, la lámina metálica se somete a diferentes operaciones en distintas estaciones de la máquina dispuestas a lo largo de una línea recta o en una trayectoria circular. Después de cada paso en una estación, la pieza se transfiere a la siguiente estación para realizarle otras operaciones.

Materiales de los troqueles y las matrices. Por lo general, los materiales de los troqueles y matrices fabricados para cizallamiento son aceros grado herramienta y carburos (para altas tasas de producción) (vea las tablas 5.7 a 5.9). La lubricación es importante para reducir el desgaste del troquel y las matrices, manteniendo así la calidad de borde.

16.2.4 Diversidad de métodos para corte de lámina metálica

Existen otros diversos métodos para el corte de láminas y placas metálicas:

- El **corte por rayo láser** es un proceso importante (sección 27.6) que, por lo general, se utiliza con equipo controlado por computadora para cortar una variedad de perfiles de forma consistente, en diversos espesores y sin el uso de troqueles. El proceso también se puede combinar con las operaciones de punzonado y cizallado. Algunas piezas de ciertas características pueden producirse mejor con un proceso mientras que otras, con características distintas, pueden ser producidas de mejor manera por otro proceso. Las máquinas de combinación, que incorporan ambas capacidades, se han diseñado y construido por esta razón (vea también el ejemplo 27.1).
- El **corte por chorro de agua** es eficaz en materiales metálicos y no metálicos (sección 27.8).
- Corte con sierra de banda; éste es un proceso para eliminar virutas.
- El **aserrado por fricción** consiste en un disco o cuchilla que se frota contra la lámina o placa a altas velocidades superficiales, aumentando así la temperatura y separando la placa en dos piezas (sección 24.5).
- El **corte con soplete** es otro método común, especialmente para las placas gruesas; se utiliza ampliamente en la construcción naval y en componentes estructurales pesados (sección 30.8).

16.3 Características y formabilidad de la lámina metálica

Después de que un formato se ha cortado a partir de una lámina más grande o de un rollo, se le forma en diversos perfiles mediante distintos procesos que se describen en el resto de este capítulo. En esta sección se presenta una breve reseña de las características de las láminas metálicas que tienen efectos significativos sobre las operaciones de formado, según lo indica la tabla 16.2.

Elongación. Los procesos de formado de láminas metálicas rara vez implican el estirado simple uniaxial, como en una prueba de tensión. Sin embargo, las observaciones obtenidas a partir de pruebas de tensión resultan muy útiles y necesarias para comprender el comportamiento de los metales en estas operaciones. De la sección 2.2, recuerde que una probeta sujeta a tensión se somete primero a una elongación uniforme y que, cuando la carga supera la resistencia máxima a la tensión, la muestra comienza a formar un cuello y la elongación ya no es uniforme.

Debido a que en el formado de láminas el material suele estar estirándose, una gran elongación uniforme resulta esencial para lograr una buena formabilidad. La deformación real a la cual comienza la formación del cuello es numéricamente igual al *exponente de endurecimiento por deformación*, n , que se muestra en la ecuación (2.8). Por lo tanto, un alto valor de n indica una gran elongación uniforme (vea también la tabla 2.3). La formación del cuello puede estar *localizada* o ser *extendida*, dependiendo de la *sensibilidad a la velocidad de deformación*, m , del material, como se indica en la ecuación (2.9). Cuanto mayor sea el valor de m , más extendido se vuelve el cuello. Un cuello extendido es deseable en las operaciones de formado de láminas. Además de la elongación uniforme y la formación de cuello, la **elongación total** de la probeta (en términos del alargamiento correspondiente a una longitud calibrada de 50 mm) es también un factor significativo en la formabilidad de los metales laminados.

Elongación en el punto de fluencia. Los aceros al bajo carbono y algunas aleaciones de aluminio y magnesio presentan un comportamiento llamado *elongación en el punto de fluencia*, el cual tiene los puntos de cedencia superior e inferior mostrados en la figura 16.12a. Este fenómeno da lugar a la aparición de **bandas de Lüder** (también llamadas *marcas de deformación por extensión* o *gusanos*) en la lámina (figura 16.12b), que son depresiones alargadas sobre la superficie de la lámina como las que pueden encontrarse en la parte inferior de las latas de acero utilizadas para envasar productos de uso común en el hogar (figura 16.12c). Estas marcas pueden ser indeseables en el producto formado porque la tosquedad en la superficie degrada la apariencia y puede causar dificultades en operaciones posteriores de pintura y recubrimiento.

TABLA 16.2

Características importantes de los metales utilizados para operaciones de formado de láminas metálicas	
Característica	Importancia
Elongación	Determina la capacidad de la lámina de metal para estirarse sin formar un cuello y fallar; se desean altos exponentes de endurecimiento por deformación (n) y de sensibilidad a la velocidad de deformación (m).
Elongación en el punto de fluencia	Por lo general, se observa en láminas de acero dulce (también llamadas bandas de Lüder o deformaciones por estiramiento); resulta en depresiones sobre la superficie de la lámina; pueden eliminarse por laminado de temple, pero la lámina debe formarse dentro de cierto tiempo después del laminado.
Anisotropía (planar)	Muestra comportamiento diferente en las distintas direcciones planares —presentes en hojas laminadas en frío— debido a la orientación preferida o a la formación mecánica de fibras; causa bordes ondulados en el embutido profundo y puede reducirse o eliminarse por recocido pero con cierta reducción de la resistencia.
Anisotropía (normal)	Determina cómo se comporta el adelgazamiento de los metales laminados durante el estiramiento, es importante en el embutido profundo.
Tamaño de grano	Determina la rugosidad superficial en las láminas de metal estiradas; cuanto más grueso sea el grano, más áspera es la apariencia (como la cáscara de una naranja); también afecta la resistencia y ductilidad del material.
Esfuerzos residuales	Por lo general, son causados por deformación no uniforme durante el formado; resultan en una distorsión de la pieza cuando ésta se secciona; pueden conducir a un agrietamiento por corrosión y esfuerzo; se reducen o eliminan al disminuir el esfuerzo.
Restitución	Debida a la recuperación elástica de la lámina deformada plásticamente después de la descarga, provoca distorsión de la pieza y pérdida de precisión dimensional; puede controlarse mediante técnicas como el sobredoblado y el recargado del punzón.
Plegado	Causado por esfuerzos de compresión localizados en el plano de la lámina, puede ser indeseable pero, dependiendo de su extensión, resultar útil al impartir rigidez a las piezas mediante el aumento de su módulo de sección; puede controlarse mediante el diseño adecuado de herramientas y troqueles.
Calidad de los bordes cortados	Depende del proceso utilizado; los bordes pueden ser ásperos, no cuadrados, y contener grietas, esfuerzos residuales y una capa endurecida por trabajo, lo cual es perjudicial para la formabilidad de la lámina; la calidad del borde puede mejorarse mediante troquelado fino, reducción de la holgura, rasurado y mejoras en el diseño de herramientas y punzones, además de considerar la lubricación.
Condición superficial de la lámina	Depende de la práctica del laminado de las piezas de trabajo (láminas); es importante en el formado de la lámina porque puede causar desgarramiento y deficiente calidad superficial.

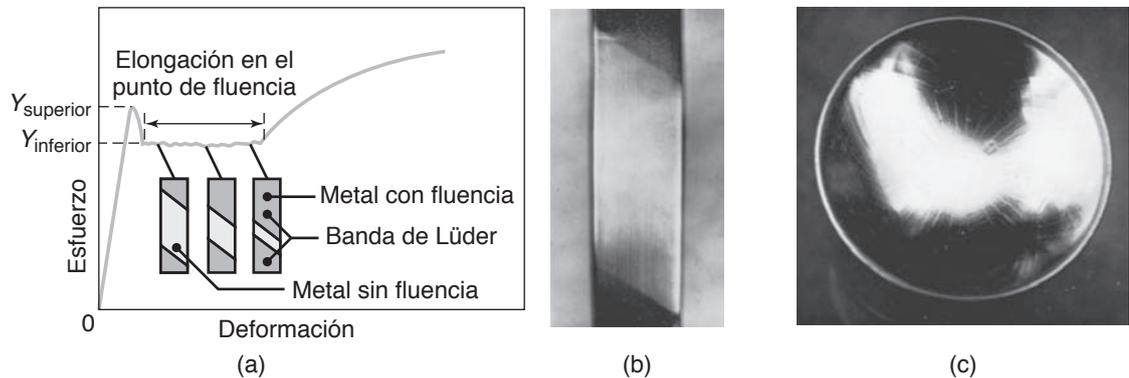


FIGURA 16.12 (a) Elongación hasta el punto de fluencia en una probeta de lámina metálica. (b) Bandas de Lüder en una lámina de acero al bajo carbono. (c) Deformaciones por estiramiento en la parte inferior de una lata de acero para envasar productos del hogar. Fuente: (b) Cortesía de Caterpillar, Inc.

El método usual para evitar las bandas de Lüder consiste en eliminar o reducir la elongación hasta el punto de fluencia mediante la reducción del espesor de la lámina de 0.5 a 1.5% por laminado en frío, lo cual se conoce como **laminación de temple** o **de piel**. Sin embargo, debido al *envejecimiento por deformación*, la elongación hasta el punto de fluencia reaparece después de unos pocos días a temperatura ambiente, o después de

unas pocas horas a temperaturas más altas, por lo que el material debe formarse dentro de cierto límite de tiempo determinado (dependiendo del material).

Anisotropía. Un factor importante que influye en el formado de lámina metálica es la *anisotropía (direccionalidad)* de la lámina (vea la figura 16.17). Recuerde que la anisotropía se adquiere durante el procesamiento termomecánico de la lámina y que hay dos tipos de anisotropía: *anisotropía cristalográfica* (orientación preferida de los granos) y *formación mecánica de fibras* (alineación de impurezas, inclusiones y huecos en todo el espesor de la lámina). La relevancia de la anisotropía se analiza en la sección 16.4.

Tamaño de grano. Tal como se describe en la sección 1.5, el tamaño de grano afecta las propiedades mecánicas e influye en el aspecto de la superficie de la pieza formada (*piel de naranja*). Cuanto menor sea el tamaño de grano, más resistente es el metal, y cuanto más grueso sea el grano, más áspero es el aspecto superficial. En general, para las operaciones de formado de láminas, se prefiere un tamaño de grano ASTM 7 o más fino (tabla 1.1).

Resistencia de las láminas metálicas a la abolladura. Las abolladuras se encuentran comúnmente en automóviles, electrodomésticos y muebles de oficina. Por lo general, son causadas por fuerzas dinámicas de objetos en movimiento que golpean la lámina metálica. Por ejemplo, en paneles automotrices típicos, las velocidades de impacto llegan a ser hasta de 45 m/s (150 pies/s). De modo que éste es el *esfuerzo dinámico de cedencia* (esfuerzo de cedencia bajo altas velocidades de deformación), en lugar del esfuerzo estático de cedencia, que es el parámetro significativo de la resistencia.

Puede demostrarse que los factores significativos en la resistencia a la abolladura son el esfuerzo de cedencia, Y , el grosor de la lámina metálica, T , y la forma del panel. Entonces, la *resistencia a la abolladura* se expresa mediante una combinación de parámetros geométricos y de los materiales, como

$$\text{Resistencia a la abolladura} = \frac{Y^2 T^4}{S}, \quad (16.2a)$$

donde S es la rigidez del panel, que a su vez se define como

$$S = ET^a(\text{forma}), \quad (16.2b)$$

donde el valor de a se encuentra entre 1 y 2 para la mayoría de los paneles. Con respecto a la forma, cuanto más plano sea el panel, mayor será su resistencia a las abolladuras debido a la flexibilidad de la lámina. Por lo tanto, la resistencia a la abolladura (1) aumenta con el incremento de la resistencia y el grosor de la lámina, (2) disminuye al aumentar el módulo de elasticidad y la rigidez y (3) decrece con la disminución de la curvatura de la lámina. En consecuencia, los paneles que se mantienen rígidamente en sus bordes tienen menor resistencia a la abolladura (debido a su mayor rigidez) que los que se sostienen mediante un conjunto de resortes.

Las fuerzas dinámicas tienden a causar *abolladuras localizadas*, mientras que las fuerzas estáticas tienden a *difundir* la zona abollada. Este fenómeno puede demostrarse al tratar de abollar una pieza de lámina metálica plana empujando un martillo de bola contra ella o golpeándola con el martillo; note cuán localizada estará la abolladura en el último caso.

16.4 Pruebas de formabilidad para láminas metálicas

Por lo general, la *formabilidad de láminas metálicas* se define como la capacidad de la lámina metálica para someterse al cambio de forma requerido sin fallar, tal como sucede con la formación de grietas, ondulaciones, cuellos, o desgarramientos. Como se observará en todo el resto de este capítulo, dependiendo de la forma de la pieza, las láminas metálicas pueden someterse a dos modos básicos de deformación: (1) *extensión* y (2) *estirado*. Existen importantes diferencias entre estos dos modos y hay distintos

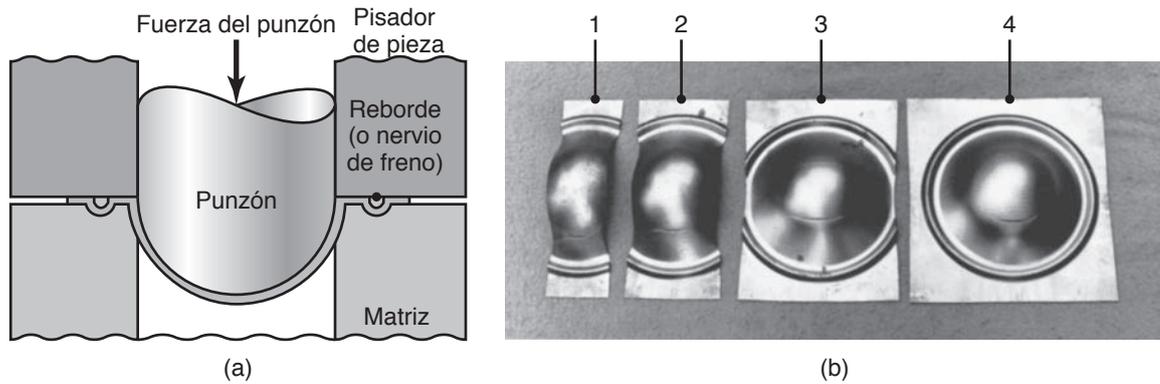


FIGURA 16.13 (a) Prueba de acopamiento (prueba de Erichsen) para determinar la formabilidad de láminas metálicas. (b) Resultados de pruebas de abombamiento en láminas de acero con diferentes anchuras; la muestra situada más a la izquierda está sometida, básicamente, a tensión simple. La muestra que se encuentra más a la derecha se somete a extensiones biaxiales iguales. Fuente: Cortesía de (a) Arcelor Mittal y (b) Inland Steel Company.

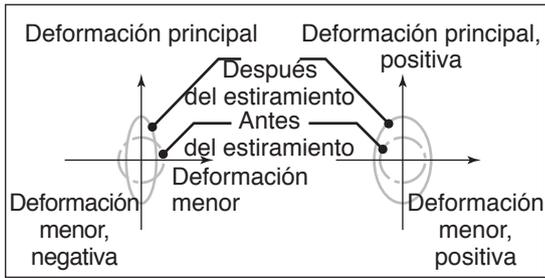
parámetros involucrados en la determinación de la formabilidad bajo diferentes condiciones. Esta sección describe los métodos que se utilizan generalmente para predecir la formabilidad.

Pruebas de acopamiento. Las primeras pruebas desarrolladas para predecir la formabilidad de láminas metálicas fueron pruebas de acopamiento (figura 16.13a). En la prueba de *Erichsen*, la muestra de lámina se sujeta entre dos matrices planas circulares y una bola de acero (o un punzón redondo) se fuerza sobre la lámina hasta que una grieta comienza a aparecer en la muestra extendida. La *profundidad del punzón, d*, a la que aparece la grieta es una medida de la formabilidad de la lámina. Aunque ésta y otras pruebas similares son fáciles de realizar, no simulan las condiciones exactas de las operaciones reales de formado y, por lo tanto, no son particularmente confiables, en especial para piezas complejas.

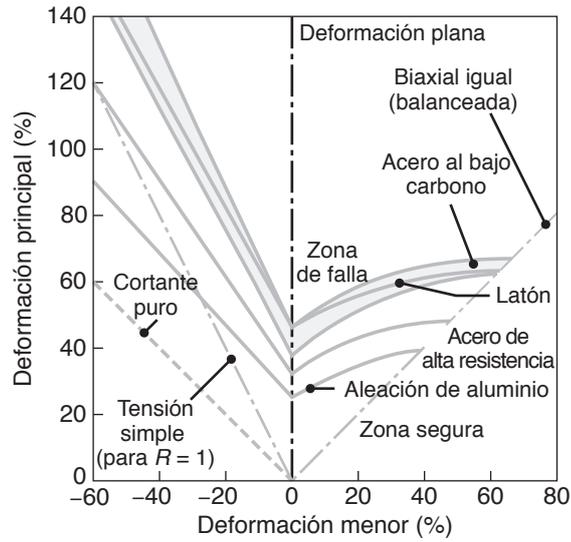
Diagramas de límite de formado. Un método importante para la determinación de la formabilidad de las láminas metálicas es el desarrollo de *diagramas de límite de formado* (FLD, por sus siglas en inglés), como se muestra en la figura 16.14. Para una lámina metálica en particular, este diagrama se construye al marcar primero la lámina plana con un patrón de rejilla en círculos (figura 16.15) utilizando técnicas químicas o de fotoimpresión. Después, el formato se estira sobre un punzón (figura 16.13a) y se observa y mide la deformación de los círculos en la región donde se produzca una falla (*formación de cuellos o desgarramientos*). Aunque los círculos suelen tener diámetros de entre 2.5 y 5 mm (0.1 y 0.2 pulg), para mayor precisión de la medición deben hacerse tan pequeños como resulte práctico.

Con el fin de simular la extensión típicamente desigual que se encuentra en las operaciones reales de formado de láminas, las muestras planas se cortan a diferentes anchos (figura 16.13b) y luego se prueban. Observe que una muestra cuadrada (la más alejada hacia la derecha en la figura) produce un *estiramiento biaxial igual* (como el conseguido al inflar un globo esférico), mientras que una muestra angosta (la más alejada hacia la izquierda en la figura), básicamente, se somete a un estado de *estiramiento uniaxial* (es decir, a tensión simple). Después que se realiza una serie de estas pruebas en una lámina de metal en particular y con diferentes grosores, se construye un diagrama de límite de formado que muestra los límites entre las zonas de falla y de seguridad (figura 16.14b).

Con el fin de desarrollar un FLD, se obtienen las deformaciones de ingeniería mayor y menor medidas a partir de la deformación de los círculos originales. En la figura 16.14a,



(a)



(b)

FIGURA 16.14 (a) Medidas de deformación en patrones de rejilla circular. (b) Diagramas de límite de formado (FLD) para diversas láminas metálicas. Aunque la deformación principal siempre es positiva (estiramiento), la deformación menor puede ser positiva o negativa. R es la anisotropía normal de la lámina tal como se describe en la sección 16.7. Fuente: Según S. S. Hecker y A. K. Ghosh.

observe que un círculo original se ha deformado en una elipse, cuyo *eje mayor* representa la dirección principal y la magnitud de la extensión. La deformación principal es la *deformación de ingeniería* en esta dirección y siempre es *positiva* (debido a que la lámina se está extendiendo). El *eje menor* de la elipse representa la dirección de menor importancia y la magnitud de la deformación en la dirección *transversal*, la cual puede haber experimentado estiramiento o encogimiento.

Note que la deformación menor puede ser *positiva* o *negativa*. Por ejemplo, si trazamos un círculo en el centro de una muestra para pruebas de tensión y luego la estiramos uniaxialmente (tensión simple), la muestra se hará más estrecha puesto que se extiende (debido al módulo de Poisson, sección 2.2.1), por lo que la deformación menor es negativa. Este comportamiento puede demostrarse con facilidad al estirar una banda elástica y observar los cambios dimensionales que experimenta. Por otro lado, si colocamos un círculo en un globo de hule esférico y lo inflamos, las deformaciones menores y mayores son positivas e iguales en magnitud.

Mediante la comparación de las áreas superficiales del círculo original y del círculo deformado en la lámina formada, también es posible determinar si el espesor de la lámina ha cambiado durante la deformación. Debido a que en la deformación plástica el volumen se mantiene constante, sabemos que si el área del círculo deformado es más grande que el círculo original, la lámina se habrá vuelto más delgada. Este fenómeno puede demostrarse fácilmente al inflar un globo y observar que se hace más transparente porque se estira y adelgaza.

Después, los datos obtenidos para diferentes ubicaciones en cada una de las muestras presentadas en la figura 16.13b se ilustran como se muestra en la figura 16.14b. Las



FIGURA 16.15 Deformación del patrón de rejilla y rasgamiento de la lámina de metal durante el formado; los ejes mayor y menor de los círculos se utilizan para determinar las coordenadas en el diagrama de límite de formado que se muestra en la figura 16.14b. Fuente: Según S. P. Keeler.

curvas representan los límites entre las zonas de falla y las *zonas de seguridad* para cada tipo de metal y, como puede observarse, entre más alta sea la curva mejor será la formabilidad de esa lámina de metal en particular. Como era de esperarse, diferentes materiales y condiciones, tales como el trabajo en frío o el tratamiento térmico, tienen diferentes diagramas de límite de formado. Tomando la aleación de aluminio mostrada en la figura 16.14b como ejemplo, si un círculo ubicado en un sitio en particular de la lámina ha experimentado deformaciones principales y menores de 20 y -10% , respectivamente, no habría ningún desgarramiento en esa ubicación de la muestra. Por otro lado, si en otro sitio de la lámina las deformaciones principales y menores fueran de 80 y -40% , respectivamente, habría un desgarramiento en ese lugar particular de la muestra. La figura 16.15 ilustra un ejemplo de una pieza de lámina metálica formada con un patrón de rejilla; note la deformación de los patrones circulares en las proximidades del desgarramiento ocurrido en la lámina formada.

Es importante notar en los diagramas de límite de formado que una deformación menor por compresión de, digamos, 20% se asocia con una deformación principal más alta de lo que es una deformación menor por tensión (positiva) de la misma magnitud. En otras palabras, es deseable que la deformación menor sea negativa (es decir, una reducción en la dirección de menor importancia). En la formación de piezas complejas, pueden diseñarse herramientas o abrazaderas especiales para aprovechar el efecto benéfico de las deformaciones menores negativas sobre la formabilidad. El efecto del espesor de la lámina en los FLD es elevar las curvas mostradas en la figura 16.14b.

La fricción y la lubricación en la superficie de contacto entre el punzón y la lámina metálica también son factores importantes en los resultados de la prueba. Con interfaces bien lubricadas, las deformaciones presentes en la lámina se distribuyen más uniformemente sobre el punzón. También, como se esperaba, y en función de los defectos y la superficie del material —como sensibilidad a la muesca, rayones en la superficie (vea *sensibilidad a la muesca*, sección 2.9), estrías profundas y manchas pueden reducir significativamente la formabilidad y dar lugar así a la falla y al desgarramiento prematuros de la pieza.

Un procedimiento que se ha seguido con cierto éxito para mejorar la formabilidad de las láminas metálicas consiste en controlar cuidadosamente y variar los parámetros del proceso durante el formado. Por ejemplo, la capacidad de embutir a profundidad (sección 16.7.1) puede mejorarse variando la fuerza del punzón (vea la figura 16.32) durante el embutido profundo. Esta fuerza puede cambiarse con la posición en la matriz si se usan varios actuadores en el pisador o en función del tiempo. En las servoprensas (descritas en la sección 14.8), pueden programarse perfiles de velocidad cuidadosamente optimizados, lo cual también mejora la formabilidad.

16.5 Doblado de láminas, placas y tubos

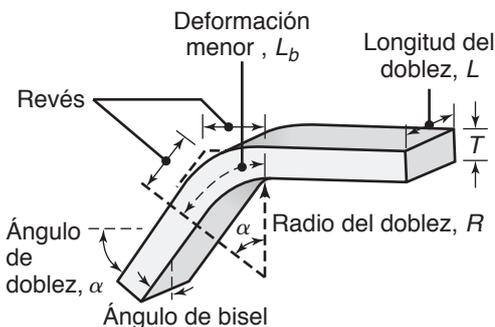


FIGURA 16.16 Terminología del doblado; note que el radio del doblado se mide en la superficie interior de la pieza doblada.

El *doblado* es una de las operaciones de formado más comunes, como lo evidencia la observación de carrocerías y tubos de escape de automóvil, electrodomésticos, clips o archivadores. El doblado también imparte rigidez a la pieza al aumentar su momento de inercia. Note, por ejemplo, cómo las ondulaciones, bridas, rebordes y costuras mejoran la rigidez de las estructuras sin añadir peso. Como ejemplo específico, observe la rigidez diametral de una lata con y sin rebordes periféricos (vea también la sección 16.7).

En la figura 16.16, se proporciona la terminología utilizada en el doblado de láminas o placas. Observe que las fibras exteriores del material están en tensión, mientras que las fibras internas están en compresión. Debido al módulo de Poisson, el ancho de la pieza (*longitud del doblado, L*) se ha vuelto más pequeño en la región exterior y más grande en la región interior del ancho original (como puede verse en la

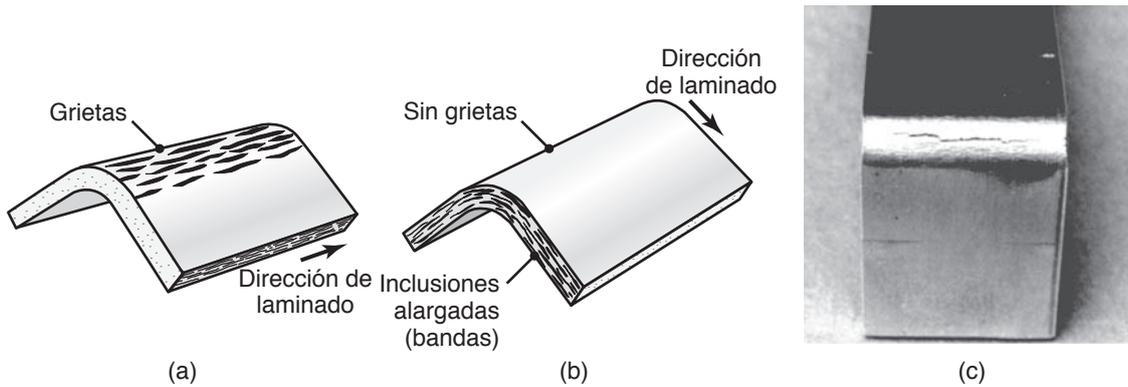


FIGURA 16.17 (a) y (b) Efecto de las inclusiones alargadas (bandas) en la formación de grietas según la dirección de doblado con respecto a la dirección del laminado original de la lámina. (c) Grietas en la superficie exterior de una tira de aluminio doblada a un ángulo de 90°. Observe también el estrechamiento de la superficie superior en la zona curva (debido al módulo de Poisson).

figura 16.17c). Este fenómeno puede observarse fácilmente al doblar una goma de borrar rectangular y advertir los cambios en su sección transversal.

Como se muestra en la figura 16.16, la **tolerancia del doblez**, L_b , es la longitud del *eje neutro* del doblez; esta tolerancia se utiliza para determinar la longitud de la pieza en bruto para una pieza que será doblada. Sin embargo, la posición del eje neutro depende del radio y del ángulo de doblez, tal como se describe en los textos sobre mecánica de materiales. Una fórmula aproximada para calcular la tolerancia del doblez la presentamos a continuación:

$$L_b = \alpha(R + kT), \quad (16.3a)$$

donde α es el ángulo de doblez (en radianes), T es el grosor de la lámina, R es el radio de doblez y k es una constante que, en la práctica, suele encontrarse entre 0.33 (para $R < 2T$) y 0.5 (para $R > 2T$). Tenga en cuenta que para el caso ideal, el eje neutro está en el centro del grosor de la lámina, $k = 0.5$ y, por lo tanto,

$$L_b = \alpha \left[R + \left(\frac{T}{2} \right) \right]. \quad (16.3b)$$

Radio mínimo de doblez. El radio al que aparece primero una grieta en las fibras exteriores de una lámina que se está doblando se conoce como *radio mínimo de doblez*. Es posible demostrar que, durante el doblado, la deformación ingenieril en las fibras exteriores e interiores de una lámina está dada por la expresión

$$e = \frac{1}{(2R/T) + 1}. \quad (16.4)$$

Por lo tanto, a medida que disminuye R/T (es decir, conforme decrece la relación del radio de doblez sobre el espesor), aumenta la deformación por tensión en la fibra exterior y el material finalmente desarrolla grietas (figura 16.17). El radio de doblez suele expresarse (recíprocamente) en términos del grosor, por ejemplo como $2T$, $3T$, $4T$, etc. (vea la tabla 16.3). Por lo tanto, un radio de doblez mínimo $3T$ indica que el radio más pequeño al que la lámina se puede doblar sin agrietarse es tres veces su grosor.

TABLA 16.3

Radio mínimo de doblez para diversos metales a temperatura ambiente

Material	Condición	
	Blando	Duro
Aleaciones de aluminio	0	6T
Cobre al berilio	0	4T
Latón (al bajo plomo)	0	2T
Magnesio	5T	13T
Aceros		
Inoxidable austenítico	0.5T	6T
Al bajo carbono, baja aleación y HSLA	0.5T	4T
Titanio	0.7T	3T
Aleaciones de titanio	2.6T	4T

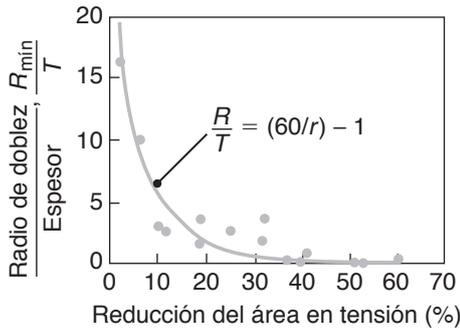


FIGURA 16.18 Relación entre R_{\min}/T y la reducción de la tensión del área para los metales laminados. Observe que la lámina metálica con una reducción del área en tensión del 50% puede doblarse sobre sí misma, en un proceso parecido al plegado de una lámina de papel, sin agrietarse. Fuente: Según J. Datsko y C. T. Yang.

Se ha demostrado que existe una relación inversa entre la facilidad de doblado (“*doblabilidad*”) y la reducción del área en tensión, r , del material (figura 16.18). El *radio de doblado mínimo*, R_{\min} , es, aproximadamente,

$$R_{\min} = T \left(\frac{50}{r} - 1 \right). \tag{16.5}$$

Por lo tanto, para $r = 50$, el radio de doblado mínimo es cero; es decir, la lámina puede doblarse sobre sí misma, lo cual se conoce como *hilvanado* o *dobladillo* (vea la figura 16.23), de un modo similar a como se dobla una lámina de papel. Para aumentar la facilidad de doblado de los metales, su reducción de área a la tensión puede aumentarse por calentamiento o por doblado en un entorno de alta presión, lo que mejora la ductilidad del material [vea efectos de la presión hidrostática (*esfuerzo hidrostático*), sección 2.2.8].

La facilidad de doblado también depende de la condición del borde de la lámina. Puesto que los bordes ásperos son puntos de concentración de esfuerzos, la facilidad de doblado disminuye a medida que aumenta la aspereza del borde. Otro factor importante en el agrietamiento del borde es la cantidad, forma y dureza de las *inclusiones* presentes en la lámina metálica y la cantidad de trabajo en frío a la que se someten los bordes durante el cizallamiento. Debido a su forma puntiaguda, las inclusiones en forma

de bandas son más perjudiciales que las inclusiones en forma globular (vea también la figura 2.24). Durante el doblado, la resistencia al agrietamiento de los bordes puede mejorarse significativamente al eliminar las regiones trabajadas en frío, ya sea mediante rasurado o maquinado de los bordes de la pieza (vea la figura 16.9) o por el recocido de la lámina para mejorar su ductilidad.

La *anisotropía* de la lámina es otro factor importante en la facilidad de doblado. El laminado en frío resulta en la anisotropía de la lámina por *orientación preferida* o por *formación mecánica de fibras* debido a la alineación de impurezas, inclusiones y huecos que pueden estar presentes (vea también la figura 1.12). Antes de preparar o anidar formatos (vea la figura 16.59) para su posterior doblado o formado, debe tenerse el cuidado de cortarlos, hasta donde sea posible, en la dirección correcta a partir de una hoja laminada.

Restitución. Debido a que todos los materiales tienen un módulo de elasticidad finito, la deformación plástica siempre va seguida por cierta recuperación elástica cuando se retira la carga (vea la figura 2.3). En flexión, a esta recuperación se le llama *restitución* y puede observarse fácilmente al doblar y después liberar una pieza de lámina metálica o alambre. Como se indica en la figura 16.19, el ángulo de doblado final de una lámina metálica después de la restitución es menor que el ángulo al que se dobla la lámina, y el radio de doblado final es mayor que antes de la restitución.

La restitución puede calcularse de manera aproximada en términos de los radios R_i y R_f (figura 16.19) como

$$\frac{R_f}{R_i} = 4 \left(\frac{R_i Y}{ET} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i Y}{ET} \right) + 1. \tag{16.6}$$

En esta fórmula, observe que la restitución aumenta a medida que aumentan la relación R/T y el esfuerzo de cedencia, Y , del material y conforme disminuye el módulo de elasticidad, E .

En el doblado con dados en V (figuras 16.20 y 16.21), es posible que el material también muestre *restitución negativa*. Ésta es una condición causada por la naturaleza de la deformación que se produce dentro de la lámina de metal justo cuando el punzón completa la operación de doblado en el extremo de la carrera. La restitución negativa no ocurre en el *doblado al aire*, que se muestra en la figura 16.22a (también llamado *doblado libre*), debido a la ausencia de las restricciones que impone un dado en V sobre el área doblada.

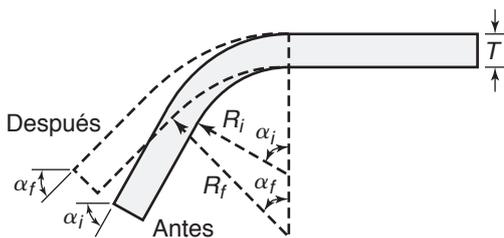


FIGURA 16.19 Restitución en flexión; la pieza tiende a recuperarse elásticamente después de ser doblada y su radio de doblado se hace más grande. Bajo ciertas condiciones, es posible que el ángulo de doblado final sea más pequeño que el ángulo original (restitución negativa).

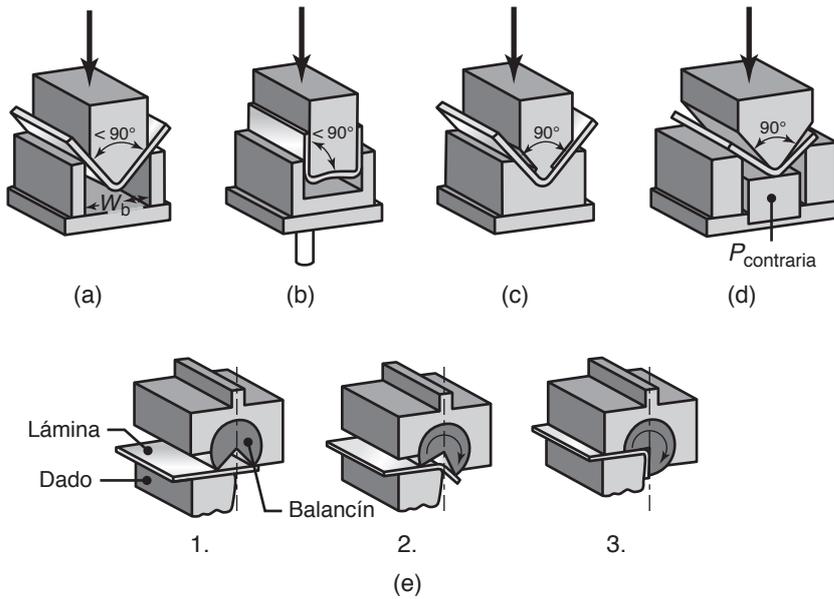


FIGURA 16.20 Métodos para reducir o eliminar la restitución en operaciones de doblado.

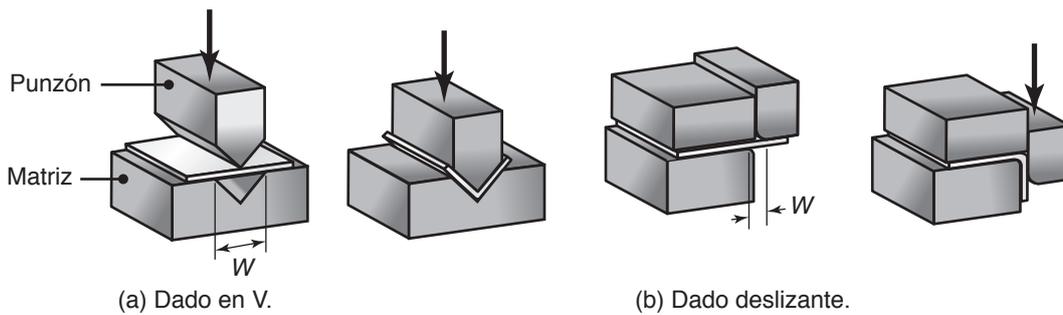


FIGURA 16.21 Operaciones comunes del doblado con dados que muestran la dimensión de la abertura del dado, W , utilizada en el cálculo de las fuerzas de doblado.

Compensación de la restitución. En las operaciones de formado, la restitución suele compensarse al doblar en exceso la pieza (figuras 16.20a y b), aunque pueden requerirse varios ensayos para obtener los resultados deseados. Otro método consiste en acuar el área doblada someténdola a esfuerzos de compresión altamente localizados entre la punta del punzón y la superficie de la matriz (figuras 16.20c y d), esta técnica es denominada *fondeo de la matriz*. En otro método, la pieza se somete a un *doblado por extensión* mediante el cual se encuentra bajo tensión externa mientras es doblada (vea también el *formado por extensión*, sección 16.6). En la figura 16.20e, el dado superior gira en sentido horario a medida que los dados se cierran.

Fuerza de doblado. La fuerza de doblado para las láminas y placas puede estimarse bajo el supuesto de que el proceso consiste en una flexión simple de una viga rectangular (como se describe en los textos sobre mecánica de sólidos). Por lo tanto, la fuerza de doblado es una función de la resistencia del material, la longitud de doblado, L , el espesor, T , de la lámina y la abertura del dado, W (vea la figura 16.21). Excluyendo la fricción, la *fuerza de doblado máxima*, P , es

$$P = \frac{kYLT^2}{W}, \quad (16.7)$$

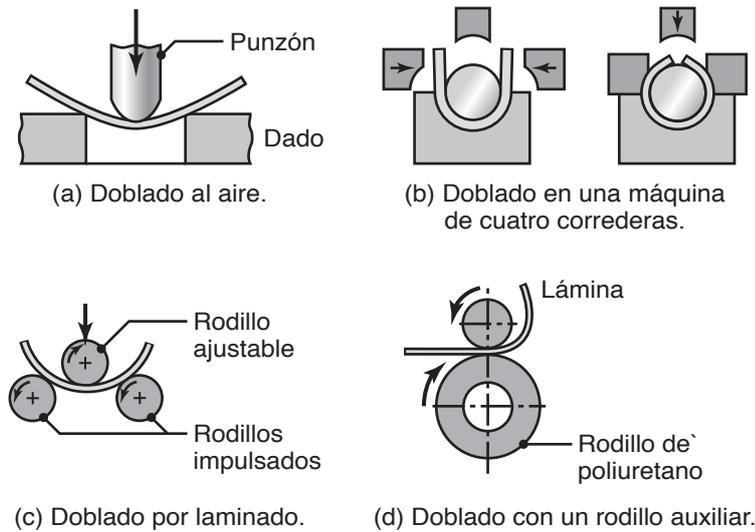


FIGURA 16.22 Ejemplos de diversas operaciones de doblado.

donde el factor k tiene valores aproximados que van desde 0.3 para un dado deslizante, 0.7 para un dado en U y hasta 1.3 para un dado en V (figura 16.21), y Y es el esfuerzo de cedencia del material.

$$P = \frac{(UTS)LT^2}{W}, \tag{16.8}$$

donde UTS es la resistencia máxima a la tensión de la lámina de metal. Esta ecuación se ajusta bien a situaciones en las que el radio de la punta del punzón y el espesor de la lámina son relativamente pequeños en comparación con la abertura del dado, W .

En el troquel, la fuerza varía a lo largo del ciclo de doblado. Aumenta desde cero hasta un máximo y puede incluso disminuir a medida que se está completando el doblez, pero luego aumenta bruscamente cuando el punzón llega a la parte inferior de su carrera. Sin embargo, en el doblado al aire (figura 16.22a), la fuerza no aumenta de nuevo después de que comienza a disminuir porque la lámina no tiene ninguna resistencia a su movimiento libre hacia abajo.

16.6 Doblados diversos y operaciones de formado relacionadas

Formado con prensa excéntrica. Las láminas metálicas o placas pueden doblarse fácilmente con accesorios sencillos usando una prensa. Por lo general, láminas o tiras estrechas de 7 m (20 pies), o incluso más largas, se doblan en una *prensa excéntrica* (figura 16.23). Esta máquina utiliza dados largos, en una prensa mecánica o hidráulica, y es particularmente adecuada para corridas de producción pequeñas. Como puede verse en la figura 16.23, las herramientas son simples, los movimientos son sólo hacia arriba y hacia abajo, y la prensa es fácilmente adaptable a una amplia variedad de formas de la pieza. La operación puede ser fácilmente automatizada para efectuar corridas de bajo costo y alta producción. Los materiales de los dados que se utilizan en prensas excéntricas van desde madera dura (para materiales de baja resistencia y corridas de producción pequeñas) hasta carburos para materiales laminados resistentes y abrasivos. En la mayoría de las aplicaciones suelen utilizarse troqueles de acero al carbono o de hierro gris.

Doblado en una máquina de cuatro correderas. El doblado de piezas relativamente cortas puede realizarse en una máquina como la que se muestra en la figura 16.22b. Los

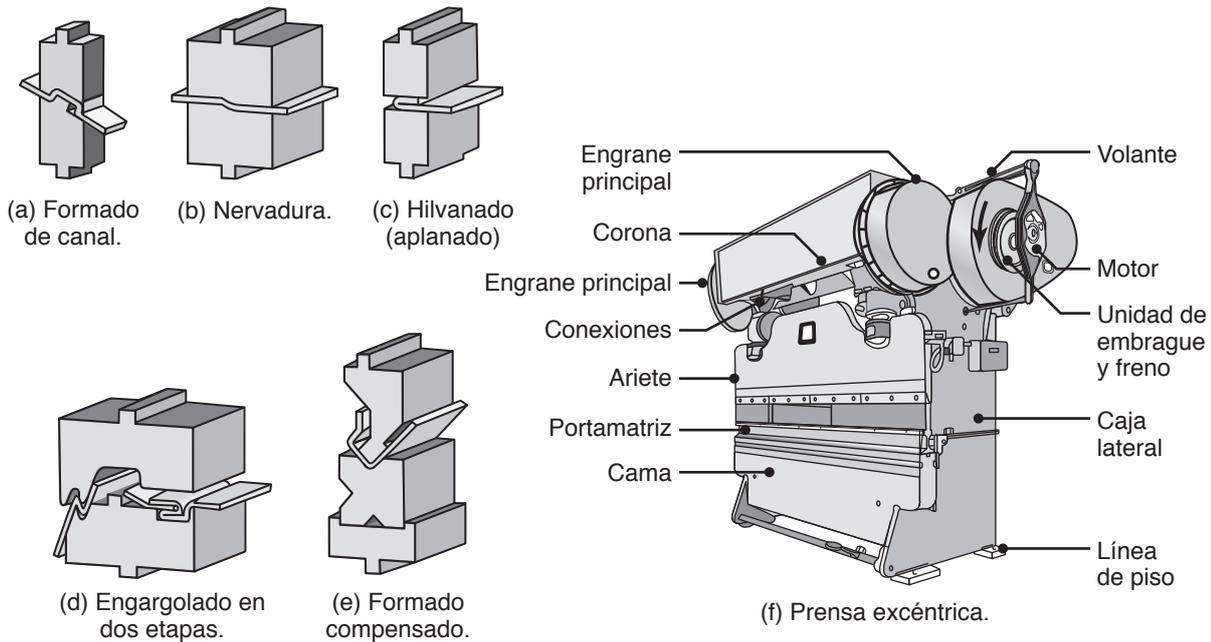


FIGURA 16.23 (a) a (e) Ilustraciones esquemáticas de diversas operaciones de doblado en una prensa excéntrica. (f) Ilustración esquemática de una prensa excéntrica. *Fuente:* Enprotech Industrial Technologies Inc.

movimientos laterales de los dados son controlados y están sincronizados con el movimiento vertical del dado para formar la pieza. Este proceso se utiliza normalmente para fabricar tubos y ductos con costura, casquillos, elementos de sujeción y diversos componentes de maquinaria.

Doblado con rodillos. En este proceso (figura 16.22c), las placas se doblan utilizando un juego de rodillos. Mediante el ajuste de la distancia entre los tres rodillos, se pueden obtener diferentes curvaturas. El proceso es flexible y se utiliza ampliamente para doblar placas en aplicaciones como calderas, contenedores cilíndricos a presión y diversos elementos estructurales curvos. La figura 16.22d muestra el doblado de una tira, con un rodillo auxiliar de poliuretano, que se ajusta a la forma de la tira a medida que el rodillo superior duro la presiona.

Rebordeado. En el *rebordeado*, la periferia de la lámina metálica se dobla en la cavidad de una matriz (figura 16.24). El reborde imparte rigidez a la pieza porque aumenta el momento de inercia de esa sección. También, los rebordes mejoran la apariencia de la pieza y eliminan bordes afilados expuestos que pueden resultar peligrosos.

Bridado. Éste es un proceso que consiste en doblar los bordes de las láminas metálicas, por lo general, a 90° (vea también la sección 16.7). En el **bridado contraído** (figura 16.25a), la brida se somete a esfuerzos circunferenciales de compresión que, si son excesivos, pueden causar que la periferia de la brida se pliegue. La tendencia al plegado aumenta con la disminución del radio de curvatura de la brida. En el *bridado estirado*, la periferia de la brida se somete a esfuerzos de tensión que, si son excesivos, pueden conducir a la formación de grietas a lo largo de la periferia (vea la figura 16.25c).

Formado con rodillos. Este proceso, al que también se le llama *formado con rodillo de contorno* o *formado con rodillo en frío*, se utiliza para formar longitudes continuas de lámina metálica y para grandes corridas de producción. A medida que pasa a través de un conjunto de rodillos impulsados, la tira de metal se dobla en etapas consecutivas (figura 16.26). Después, la tira formada se corta a una longitud determinada y se apila.

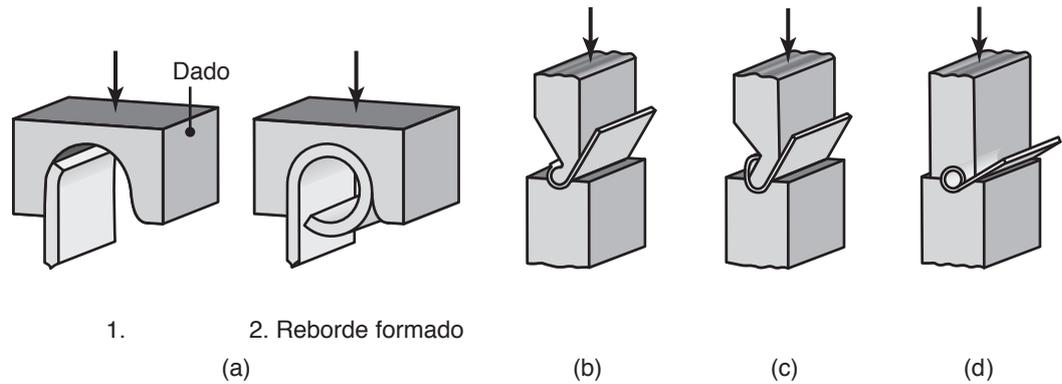


FIGURA 16.24 (a) Formado de rebordes con un solo dado. (b) a (d) Formado de rebordes con dos dados en una prensa excéntrica.

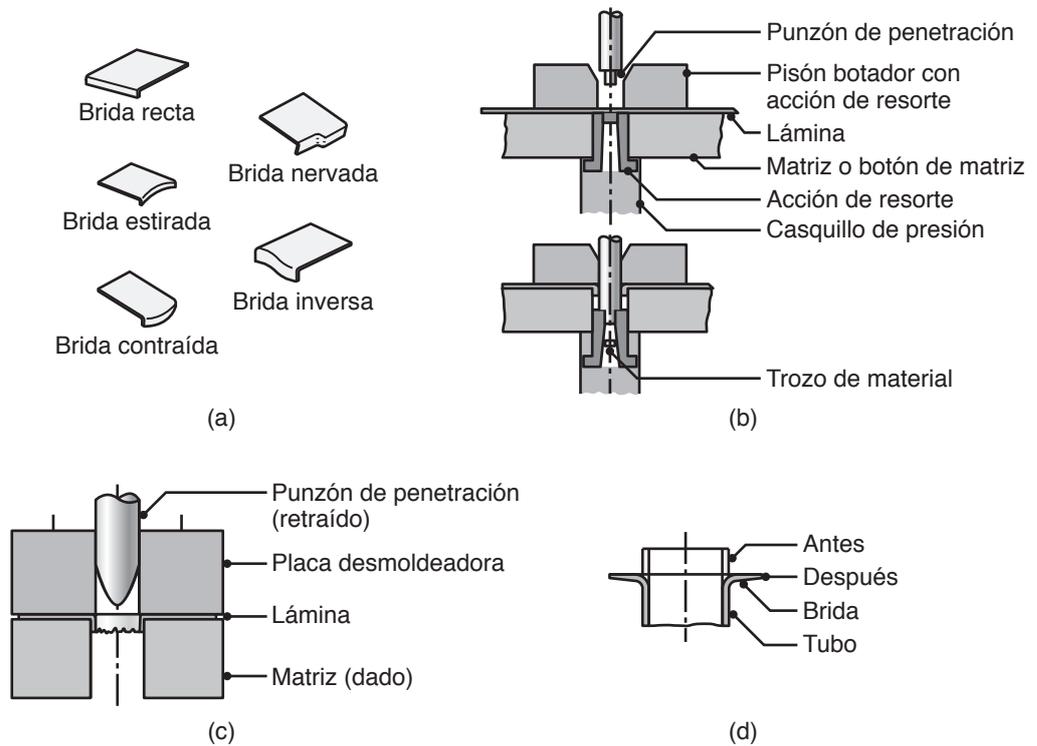


FIGURA 16.25 Diversas operaciones de bridado. (a) Bridas de lámina plana. (b) Horadado. (c) Perforación de lámina metálica para formar una brida. En esta operación, no es necesario perforar previamente un orificio antes del descenso del punzón; observe los bordes ásperos a lo largo de la circunferencia de la brida. (d) Bridado de un tubo; note el adelgazamiento de los bordes de la brida.

Entre los productos típicos que se forman con rodillo están marcos para puertas y pinturas, paneles, canales, canalones, laterales y tubos con costura de seguridad (vea la sección 32.5). La longitud de la pieza sólo está limitada por la cantidad de lámina metálica suministrada a los rodillos a partir de un rollo de material. Por lo general, el espesor de la lámina oscila aproximadamente entre 0.125 y 20 mm (0.005 y 0.75 pulg). Las velocidades del formado suelen estar por debajo de 1.5 m/s (300 pies/min), aunque pueden ser mucho más altas para aplicaciones especiales.

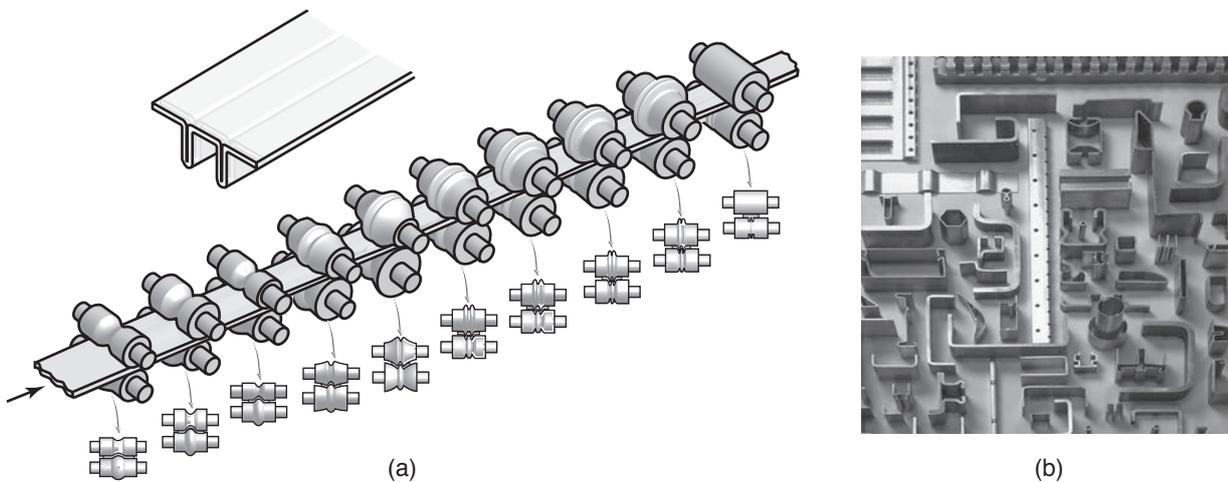


FIGURA 16.26 (a) Ilustración esquemática del proceso de formado con rodillos. (b) Ejemplos de secciones transversales formadas con rodillo. *Fuente:* (b) Cortesía de Sharon Custom Metal Forming, Inc.

En el diseño de los rodillos y su secuencia, deben considerarse las tolerancias dimensionales y la restitución, así como el desgarramiento y el pandeo de la tira. Los rodillos suelen hacerse de acero al carbono o de hierro gris, además pueden cromarse para obtener un mejor acabado superficial del producto formado y para reducir el propio desgaste. Pueden usarse lubricantes para reducir el desgaste, mejorar el acabado superficial y enfriar los rodillos y la lámina en formación.

Doblado y formado de tubos. El doblado y formado de tubos y otros perfiles huecos requieren herramientas especiales debido a la tendencia al pandeo y plegado, como puede observarse al intentar doblar una pieza de tubería de cobre o incluso una pajilla de plástico. El método más antiguo para doblar un tubo consiste en llenarlo primero con partículas sueltas (normalmente arena) y luego doblarlo con un accesorio adecuado. La función del relleno es evitar que el tubo se doble hacia dentro, después de que el tubo ha sido doblado, la arena se sacude. Los tubos también pueden conectarse mediante diversos mandriles internos flexibles (figura 16.27) con el mismo propósito que la arena. Observe que, debido a su menor tendencia al pandeo, un tubo relativamente grueso puede doblarse de manera segura sin usar materiales de relleno o tapones (vea también *hidroformado de tubos*, sección 16.8).

El efecto benéfico de formar metales bajo esfuerzos altamente compresivos se demuestra en la figura 16.28 para el doblado de un tubo con esquinas relativamente agudas. En esta operación, observe que el tubo se somete a esfuerzos de compresión longitudinales, lo cual reduce los esfuerzos en las fibras exteriores del área doblada mejorando así la facilidad al doblado del material.

Horadado, penetrado y abocinado. En el *horadado* (figura 16.25b), primero se perfora un orificio y luego se expande en una brida. Las bridas también pueden producirse por penetrado con un punzón formado (figura 16.25c) y los extremos de los tubos pueden embriarse mediante un proceso similar (figura 16.25d). Cuando el ángulo de doblez es menor de 90° , como en los accesorios con extremos cónicos, el proceso se llama *abocinado*. La condición de los bordes cortados (vea la figura 16.3) es importante en estas operaciones porque el estiramiento del material provoca altos esfuerzos de tensión a lo largo de la periferia (esfuerzos circunferenciales de tensión), los cuales pueden conducir al agrietamiento y al desgarramiento de la brida.

A medida que aumenta la relación del diámetro de la brida sobre el diámetro del orificio, las deformaciones aumentan proporcionalmente. Por lo tanto, dependiendo de la aspereza del borde, habrá una tendencia al agrietamiento a lo largo de la periferia ex-

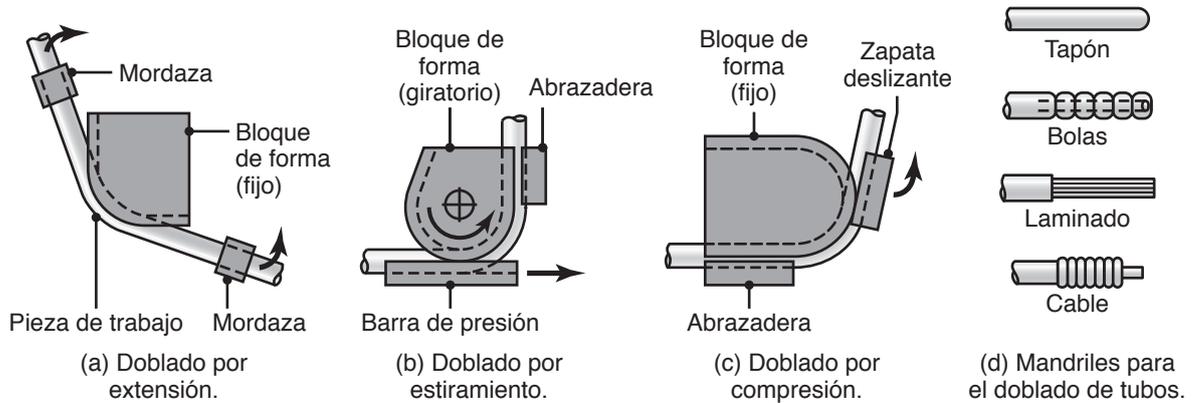


FIGURA 16.27 Métodos para el doblado de tubos. Con frecuencia, es necesario usar mandriles internos o rellenar los tubos con materiales en forma de partículas —como la arena— para evitar el colapso de la tubería durante el doblado. Los tubos también pueden doblarse mediante una técnica en la que un resorte de tensión rígido y helicoidal se desliza sobre el tubo. La holgura entre el diámetro exterior del tubo y el diámetro interior del resorte es pequeña, por lo que el tubo no puede enredarse y el doblado es uniforme.

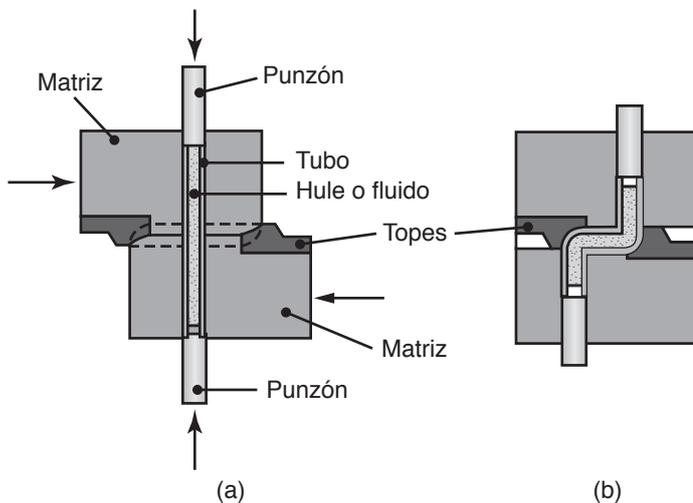


FIGURA 16.28 Método para formar un tubo con ángulos agudos aplicando una fuerza de compresión axial; los esfuerzos de compresión son benéficos en las operaciones de formado porque retrasan la fractura. Observe que el tubo está soportado internamente con hule o fluidos para evitar su colapso durante el formado. Fuente: Según J. L. Remmerswaal y A. Verkaik.

terior de la brida. Para reducir esta posibilidad, los bordes cortados o perforados pueden rasurarse con una herramienta afilada (vea la figura 16.9) para mejorar el acabado superficial del borde.

Hilvanado y cosido. En el proceso de *hilvanado*, también llamado *aplanado*, el borde de la lámina se pliega sobre sí mismo (figura 16.23c). El hilvanado aumenta la rigidez de la pieza, mejora su apariencia y elimina los bordes afilados. El *cosido* implica unir dos bordes de lámina mediante hilvanado (figura 16.23d). La doble costura se hace mediante un proceso similar usando rodillos formados especialmente para hacer juntas herméticas en agua y aire, como las uniones de los envases para alimentos y bebidas.

Abombamiento. Este proceso consiste en colocar una pieza tubular, cónica o curvilínea, en una matriz hembra dividida para después expandir la pieza, generalmente con un tapón de poliuretano (figura 16.29a). Enseguida, el punzón se retrae, el tapón vuelve a su forma original (por recuperación elástica total) y la pieza formada se retira mediante la apertura de la matriz dividida. Productos típicos que se

fabrican por abombamiento son dispensadores de café o agua, barriles de cerveza y rebordes en los tambores de aceite. Para piezas con formas complejas, el tapón puede estar formado en lugar de ser cilíndrico para poder aplicar presiones más altas en regiones críticas de la pieza. Las principales ventajas del uso de tapones de poliuretano son su alta resistencia a la abrasión y al desgaste y que no dañan el acabado superficial de la pieza que está siendo formada.

Dados segmentados. Estos dados consisten en segmentos individuales que se colocan dentro de la pieza a formar y se expanden de manera mecánica en una dirección generalmente radial. Enseguida, los segmentos se retraen para retirar la pieza formada. Estos dados son relativamente baratos y pueden utilizarse en grandes corridas de producción.

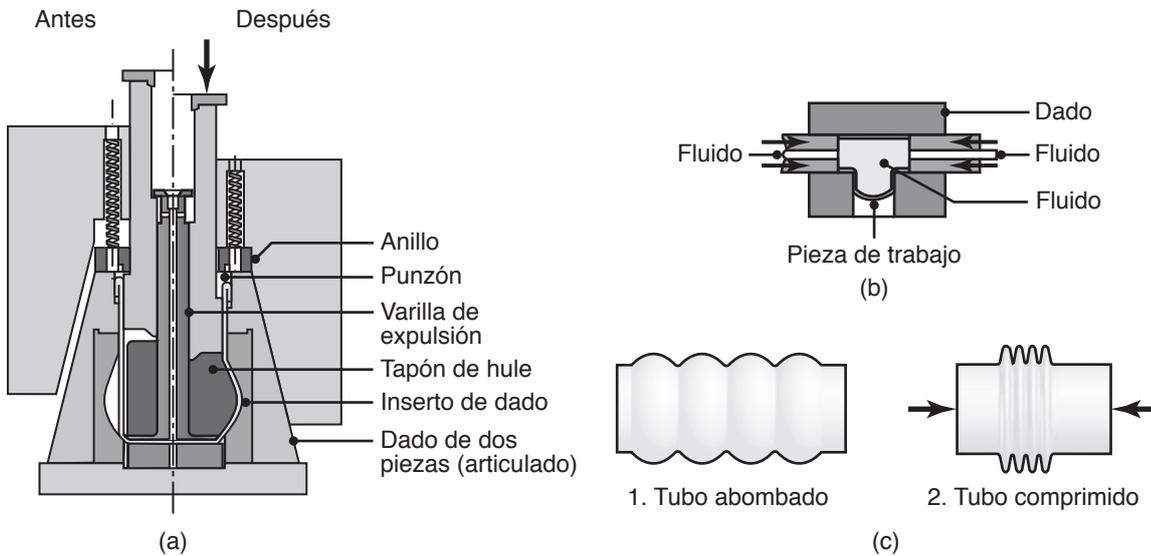


FIGURA 16.29 (a) Abombamiento de una pieza tubular con un tapón flexible; con este método pueden hacerse dispensadores de agua. (b) Producción de accesorios para tuberías mediante la expansión de piezas tubulares bajo presión interna; después se punzona la parte inferior de la pieza para producir una “T”. (c) Pasos para la fabricación de fuelles. *Fuente:* (b) Según J. A. Schey, *Introduction to Manufacturing Processes*, 3a. ed., 2000, McGraw-Hill, p. 425. ISBN núm. 0-07-031136-6.

Formado por extensión. En el *formado por extensión*, la lámina se fija a lo largo de sus bordes y luego se extiende sobre un dado macho, llamado *bloque de forma* o *punzón de forma*. El dado puede moverse hacia arriba, hacia abajo o hacia los lados, dependiendo del diseño particular de la máquina (figura 16.30). El formado por extensión se utiliza principalmente para hacer los paneles exteriores para las alas de los aviones, fuselajes y cascos de barcos. Por ejemplo, los paneles de aluminio para los aviones Boeing 767 y 757 se hacen mediante formado por extensión con una fuerza tensil de 9 MN (2 millones de libras). Las láminas rectangulares son de 12 m × 2.5 m × 6.4 mm (40 pies × 8.3 pies × 0.25 pulg). Aunque este proceso se utiliza generalmente para la producción de bajo volumen, es versátil y económico, en particular para aplicaciones en la industria aeroespacial.

En la mayoría de las operaciones, la pieza en bruto es una lámina rectangular que se sujeta a lo largo de sus bordes más estrechos y se estira longitudinalmente, permitiendo así que el material se contraiga en su anchura. El control de la cantidad de estiramiento es importante para evitar que la pieza se desgarre. El formado por extensión no puede producir piezas con contornos afilados o esquinas reentrantes. Junto con el formado por extensión, es posible utilizar diversos equipos accesorios, incluyendo un formado adicional con dados macho y hembra mientras la pieza está bajo tensión. Por lo general, los dados para el formado por extensión están hechos a partir de aleaciones de zinc, acero, plástico o madera. La mayoría de las aplicaciones requieren poca o ninguna lubricación.

16.7 Embutido profundo

Es necesario hacer notar que muchas piezas de lámina metálica son *cilíndricas* o tienen *forma de caja*, por ejemplo las ollas y sartenes y todo tipo de recipientes para alimentos y bebidas (figura 16.31), los fregaderos de cocina de acero inoxidable, latas y tanques de combustible para automóvil. Tales piezas se hacen generalmente aplicando un proceso en el cual un punzón fuerza a una pieza en bruto de lámina plana a entrar en una cavidad de troquel, como se muestra en la figura 16.32a. El embutido profundo es uno de los procesos de trabajo con metales más importantes debido a su uso generalizado.

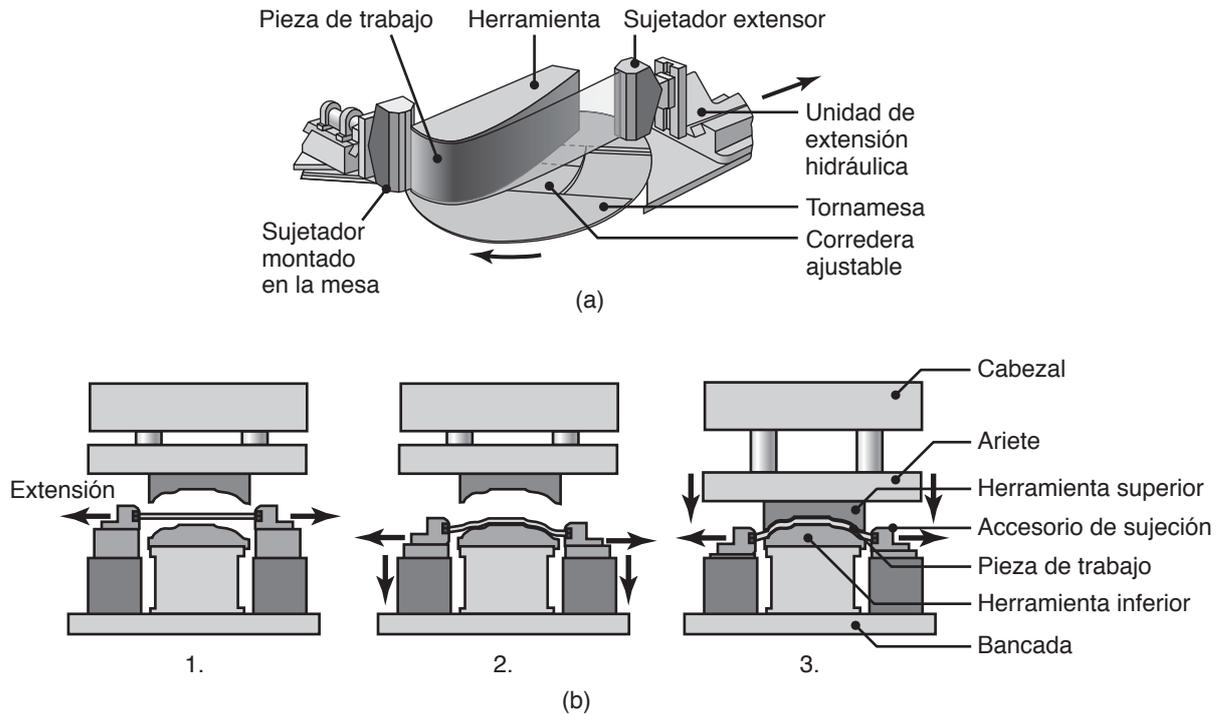


FIGURA 16.30 Ilustración esquemática de un proceso de formado por extensión; con este método pueden hacerse paneles de aluminio para aviones. *Fuente:* (a) Cortesía de Cyril Bath Co.

Consideremos el caso de un disco de lámina metálica que se coloca sobre la abertura de una matriz circular y se mantiene en su sitio con un **pisador de pieza** o *aro de sujeción* (figura 16.32b). El punzón se desplaza hacia abajo, forzando al disco a entrar en la cavidad de la matriz, formando de esta manera una copa. En este proceso, las variables principales son: (a) las propiedades de la lámina metálica; (b) la relación del diámetro del formato (disco), D_o ; (c) el diámetro del punzón, D_p ; (d) la holgura, c , entre el punzón y la matriz; (e) el radio del punzón, R_p ; (f) el radio de la esquina de la matriz, R_a ; (g) la fuerza del pisador de la pieza, y (k) la fricción y lubricación en todas las superficies de contacto.

Durante la operación de embutido, el movimiento del formato en la cavidad del troquel induce esfuerzos de compresión circunferenciales (de lazo) en el borde o ceja, los cuales tienden a causar que el borde se pliegue durante el estirado. Este fenómeno puede demostrarse simplemente al tratar de forzar la entrada de una pieza circular de papel en una cavidad redonda. Los pliegues pueden reducirse o eliminarse si se presiona un pisador hacia abajo con cierta fuerza. Con el fin de mejorar el desempeño, la magnitud de esta fuerza puede controlarse por computadora en función del viaje del punzón o de la ubicación en el pisador de la pieza.

Debido a las muchas variables implicadas, la *fuerza de la matriz*, F , resulta difícil de calcular directamente. Sin embargo, se ha demostrado que la *fuerza máxima del punzón*, $F_{\text{máx}}$, puede estimarse a partir de la fórmula

$$F_{\text{máx}} = \pi D_p T (\text{UTS}) \left[\left(\frac{D_o}{D_p} \right) - 0.7 \right], \quad (16.9)$$

donde la nomenclatura es igual a la de la figura 16.32b. Es posible observar que la fuerza aumenta con el incremento del diámetro del formato, del espesor de la lámina, de la fuerza y de la relación (D_o/D_p) . La pared de la copa que se está embutiendo se somete principalmente a un esfuerzo de tensión longitudinal (vertical) debido a la fuerza del punzón. La elongación bajo este esfuerzo hace que la pared de la copa se vuelva más delgada y, de ser excesiva, puede causar el *desgarre* de la copa.

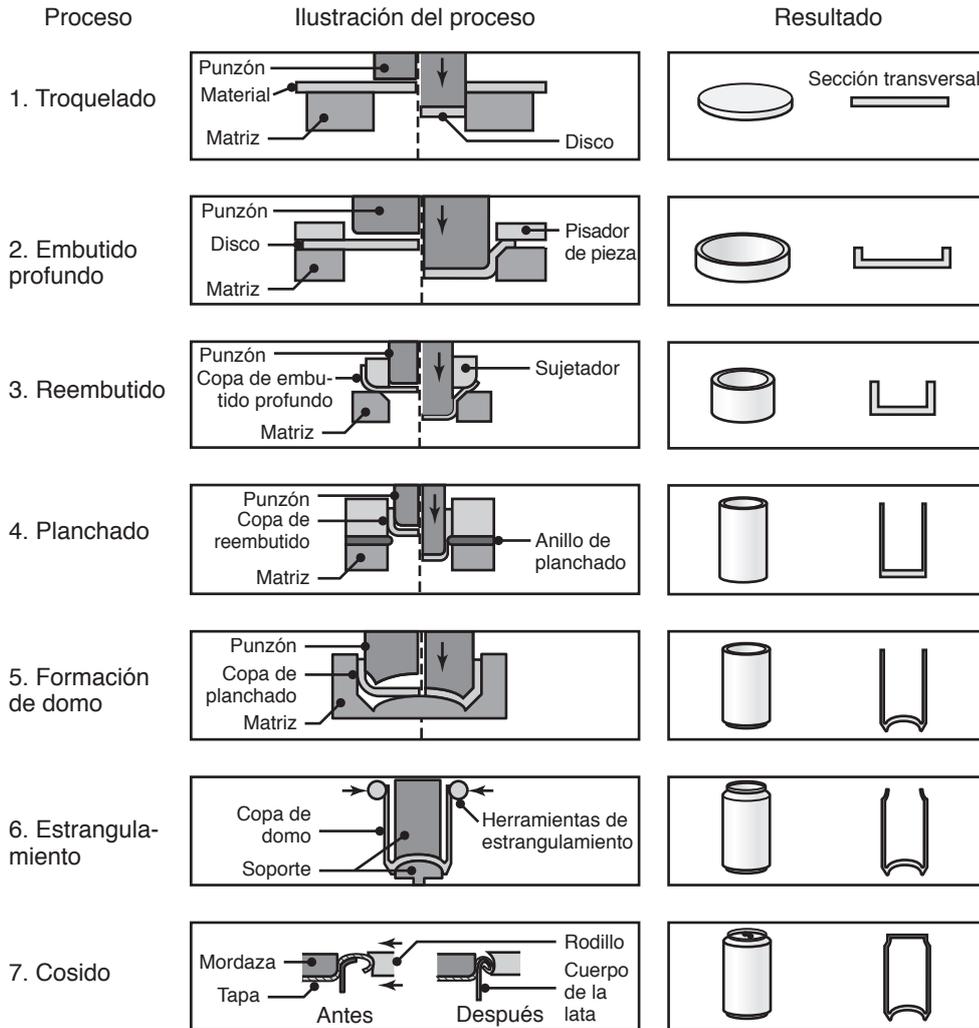


FIGURA 16.31 Procesos para el formado de metales empleados en la manufactura de latas de aluminio para envasar bebidas y hechas en dos piezas.

16.7.1 Capacidad de embutido

En una operación de embutido profundo, la falla resulta generalmente por *adelgazamiento* de la pared de la copa bajo los altos esfuerzos de tensión longitudinales debidos a la acción del punzón. Siguiendo el movimiento del material a medida que fluye en la cavidad de la matriz, se puede observar que la lámina metálica (a) debe ser capaz de experimentar una reducción en la anchura debido a una disminución del diámetro y (b) también debe resistir el adelgazamiento bajo los esfuerzos de tensión longitudinales experimentados en la pared de la copa.

Por lo general, la capacidad de embutido o *embutibilidad profunda* se expresa mediante la *relación de embutido límite* (LDR, por sus siglas en inglés) como

$$\text{LDR} = \frac{\text{Diámetro máximo de la pieza en bruto}}{\text{Diámetro del punzón}} = \frac{D_o}{D_p}. \quad (16.10)$$

Se ha encontrado que el hecho de que una lámina metálica en particular pueda embutirse profundamente con éxito en una copa redonda es una función de la *anisotropía normal*, R (también llamada *anisotropía plástica*), de la lámina de metal. La anisotropía

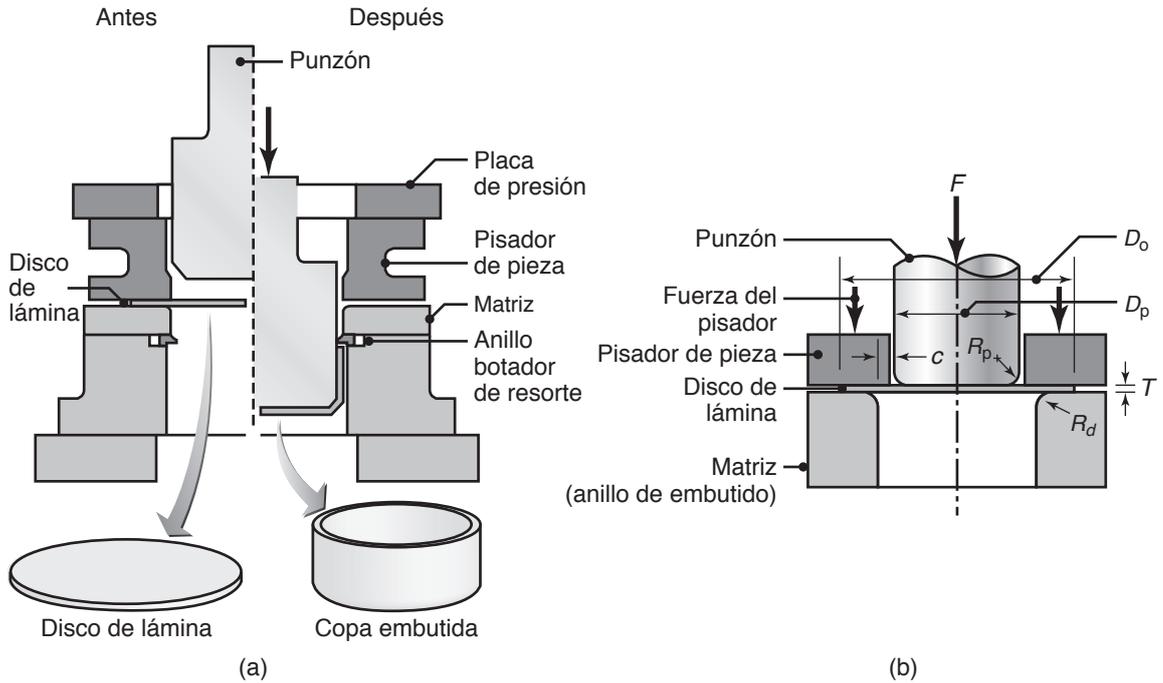


FIGURA 16.32 (a) Representación esquemática del proceso de embutido profundo en un disco de lámina metálica; el anillo botador facilita el retiro de la copa formada en la matriz. (b) Variables del proceso de embutido profundo. Exceptuando la fuerza del punzón, F , todos los parámetros indicados en la figura son variables independientes.

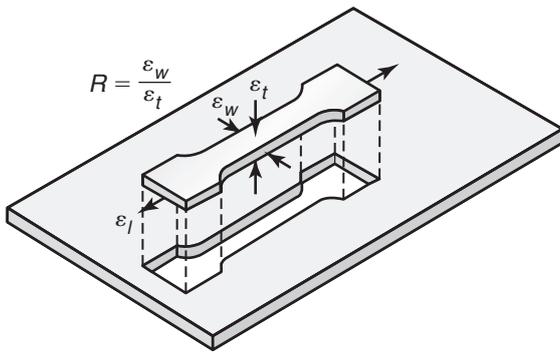


FIGURA 16.33 Deformaciones en una muestra para pruebas de tensión recortada a partir de una pieza de lámina metálica; estas deformaciones se utilizan para determinar la anisotropía normal y plana de la lámina metálica.

normal se define en términos de las deformaciones reales que experimenta una muestra para pruebas a tensión (figura 16.33):

$$R = \frac{\text{Deformación de anchura}}{\text{Deformación de espesor}} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (16.11)$$

Con el fin de determinar la magnitud de R , primero se prepara una muestra y se le somete a una elongación de entre 15 y 20%. Después, tal como fue descrito en la sección 2.2, se calculan las deformaciones verdaderas que experimenta la lámina. Debido a que las hojas laminadas en frío suelen ser anisotrópicas en su dirección *planar*, el valor R de una muestra recortada de una hoja laminada dependerá de su orientación con respecto a la dirección del laminado de la hoja. Un valor promedio, R_{prom} , se calcula a partir de la ecuación

$$R_{prom} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4}, \quad (16.12)$$

donde los subíndices son los ángulos con respecto a la dirección del laminado de la lámina. En la tabla 16.4 se proporcionan algunos valores típicos de R_{prom} .

En la figura 16.34 se muestra la relación entre R_{prom} y la relación de embutido límite determinada experimentalmente. Se ha establecido que ninguna otra propiedad mecánica de la lámina metálica muestra una relación más consistente con la LDR que R_{prom} . Por lo tanto, mediante el uso de una simple prueba de tensión y la obtención de la anisotropía normal de la lámina metálica es posible determinar la LDR de un material.

Bordes ondulados. En el embutido profundo, los bordes de las copas pueden llegar a ondularse, por lo que se denominan *bordes ondulados* (figura 16.35). Estos bordes son indeseables en las copas de embutido profundo porque deben ser recortados, no tienen ningún propósito útil e interfieren con el tratamiento posterior de la copa, lo que resulta en la generación de desechos. Los bordes ondulados se generan por causa de la **anisotropía planar** de la lámina metálica y las ondulaciones producidas pueden ser dos, cuatro u ocho, dependiendo de la historia del procesamiento y de la microestructura del material. Si la lámina es más resistente en la dirección de laminado que en la dirección transversal al laminado y la resistencia varía de manera uniforme con respecto a la orientación, entonces se forman dos ondas. Si la lámina tiene alta resistencia en diferentes orientaciones, entonces se formarán más ondulaciones.

La anisotropía planar de la lámina, indicada por ΔR , se define en términos de los valores direccionales de R a partir de la ecuación

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \tag{16.13}$$

Cuando $\Delta R = 0$ no se forman ondulaciones y la altura de éstas aumenta a medida que se incrementa ΔR .

Se puede observar que la capacidad de embutido mejora con un alto valor R_{prom} y una baja ΔR . Sin embargo, generalmente, las láminas metálicas con alto R_{prom} también tienen altos valores de ΔR . Se siguen desarrollando texturas de lámina metálica para mejorar la capacidad de embutido mediante el control del tipo de elementos de aleación presentes en el material y el ajuste de diversos parámetros de procesamiento durante el laminado en frío de la lámina.

16.7.2 Práctica del embutido profundo

A través de los años, se han establecido algunos lineamientos para la práctica exitosa del embutido profundo. Por lo general, la presión del pisador se elige entre 0.7 y 1.0% de la suma de la resistencia a la cedencia y la resistencia máxima a la tensión de la lámina metálica. Una fuerza demasiado alta del pisador aumenta la fuerza del punzón y hace que la pared de la copa se desgarre. Por otro lado, si la fuerza del pisador es demasiado baja, se producen flexiones en el borde de la copa.

Usualmente, las holguras son entre 7 y 14% mayores que el espesor de la lámina. Si son demasiado pequeñas, la pieza en bruto puede ser perforada o cortada por el punzón. Los radios de esquina del punzón y de la matriz también son parámetros importantes. Si son demasiado pequeños, pueden causar fracturas en las esquinas, y si son demasiado grandes, la copa de la pared puede plegarse, lo cual se conoce como *arrugamiento*.

Con frecuencia se requieren **rebordes** o **frenos de embutido** (figura 16.36) para controlar el flujo de la pieza en bruto en la cavidad de la matriz. Estos rebordes o frenos restringen el libre flujo de la lámina metálica al doblarla y desdoblarla durante el ciclo de embutido, lo que aumenta la resistencia requerida para jalar la lámina en la cavidad del troquel. Los frenos de embutido también ayudan a reducir las fuerzas necesarias del pisador, ya que la lámina rebordeada tiene una rigidez más alta (por su mayor momento de inercia) y, en consecuencia, tiene menor tendencia a arrugarse. Los diámetros de los frenos de embutido pueden variar entre 13 y 20 mm (0.50 y 0.75 pulg), este último diámetro es aplicable a grandes piezas estampadas, como los paneles para automóvil.

Los frenos de embutido también son útiles en la elaboración de piezas en *forma de caja* y *no simétricas* (figura 16.36b y c). Por ejemplo, observe en la

TABLA 16.4

Rangos típicos de la anisotropía normal promedio para diversos metales laminados

Material	Rango de R_{prom}
Aleaciones de zinc	0.4-0.6
Acero laminado en caliente	0.8-1.0
Acero efervescente, laminado en frío	1.0-1.4
Acero calmado desoxidado con aluminio, laminado en frío	1.4-1.8
Aleaciones de aluminio	0.6-0.8
Cobre y latón	0.6-0.9
Aleaciones de titanio (alfa)	3.0-5.0
Aceros inoxidables	0.9-1.2
Aceros de baja aleación y alta resistencia	0.9-1.2

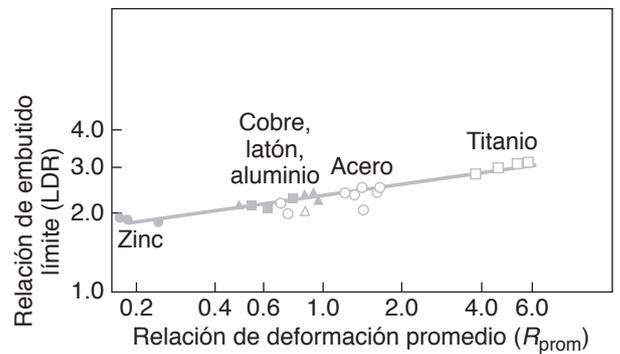


FIGURA 16.34 Relación entre la anisotropía normal promedio y la relación de embutido límite para diversos metales laminados. Fuente: Según M. Atkinson.



FIGURA 16.35 Bordes ondulados en una copa de acero embutido causados por la anisotropía planar de la lámina metálica.

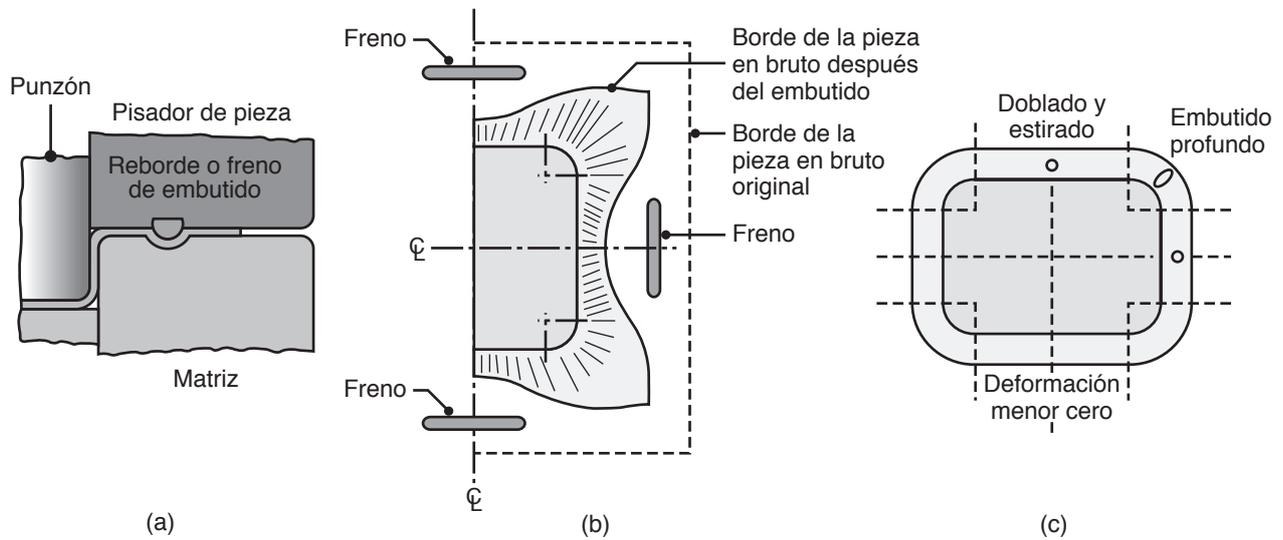


FIGURA 16.36 (a) Ilustración esquemática de un freno de embutido. (b) Flujo del metal durante el embutido de una pieza en forma de caja mientras se usan frenos para controlar el movimiento del material. (c) Deformación de rejillas circulares en la brida durante el embutido profundo.

figura 16.36c que las diversas regiones de la pieza que se está embutiendo experimentan diferentes tipos de deformación durante el embutido. (Recuerde también el principio fundamental de que el material fluye en la dirección de menor resistencia).

Con el fin de evitar el desgarramiento de la lámina durante el formado, a menudo es necesario incorporar lo siguiente:

- Diseño y ubicación adecuados de los rebordes o frenos de embutido.
- Radios de matriz grandes.
- Lubricación eficaz.
- Tamaño y forma adecuados de la pieza en bruto.
- Corte de las esquinas de las piezas en bruto con formas cuadradas o rectangulares a 45° para reducir los esfuerzos de tensión que se desarrollan durante el embutido.
- Uso de piezas en bruto libres de defectos internos y externos, incluyendo rebabas.

Planchado. Si la holgura entre el punzón y la matriz es lo suficientemente grande, la copa embutida tendrá paredes más gruesas en su borde que en su base (vea la figura 16.32). La razón de esto es que el borde de la copa se compone de material tomado del diámetro exterior del disco de material, por lo que su diámetro se ha reducido más y, por lo tanto, se vuelve más grueso que el material que constituye el resto de la pared de la copa. Como resultado, la copa desarrollará un espesor de pared no uniforme.

El espesor de pared puede controlarse mediante el *planchado*, un proceso en el que una copa embutida se empuja a través de uno o más anillos de planchado (vea la figura 16.31). La holgura entre el punzón y los anillos de planchado es menor que el espesor de pared de la copa, por lo tanto la copa embutida tiene esencialmente un espesor de pared constante. Por ejemplo, las latas de aluminio para bebidas son empujadas a través de un conjunto de dos o tres anillos de planchado en una sola carrera.

Reembutado. Los contenedores que son demasiado difíciles de embutir en una sola operación, generalmente se someten a un *reembutado* (vea la figura 16.37). Debido a la constancia del volumen del metal, la copa se hace más larga a medida que se reembute a diámetros más pequeños. En el *reembutado inverso*, la copa se coloca boca abajo en el troquel y, por lo tanto, se somete a flexión en la dirección opuesta a su configuración original.

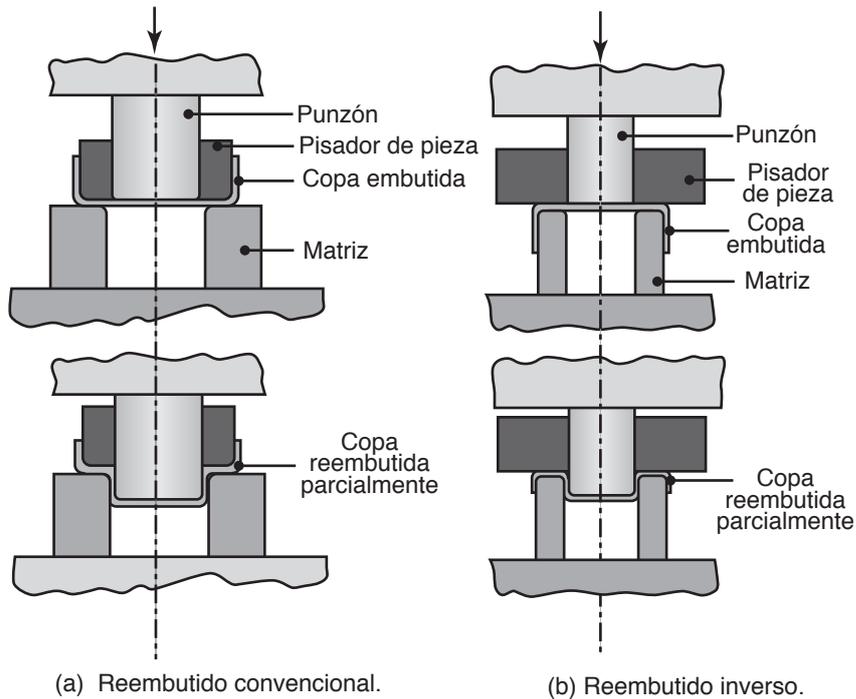


FIGURA 16.37 Reducción del diámetro de copas embutidas mediante operaciones de reembutido: (a) reembutido convencional y (b) reembutido inverso. Los contenedores profundos de diámetro pequeño pueden someterse a varias operaciones de reembutido.

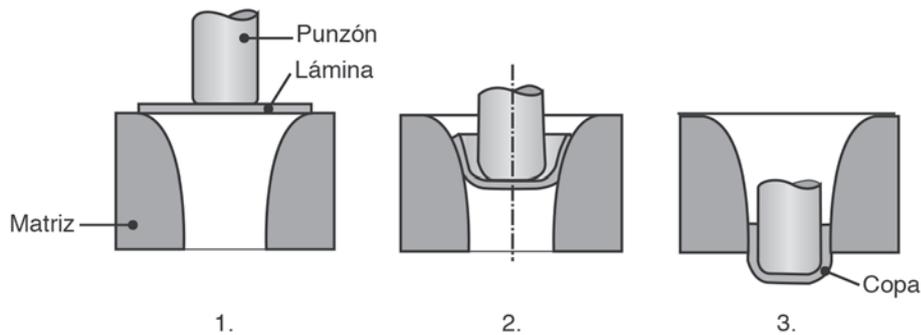


FIGURA 16.38 Etapas del embutido profundo sin pisador usando un perfil de matriz *tractriz*.

Embutido sin pisador. El embutido profundo también puede realizarse sin un pisador de pieza. Las matrices están especialmente contorneadas para esta operación con el fin de evitar la formación de pliegues; en la figura 16.38 se muestra un ejemplo. La lámina debe ser lo suficientemente gruesa como para evitar las arrugas. La fórmula siguiente es una guía general:

$$D_o - D_p < 5T, \quad (16.14)$$

donde T es el espesor de la lámina. Por lo tanto, cuanto más gruesa sea la lámina, mayor será el diámetro del disco de material y más profunda será la copa que pueda hacerse sin formación de pliegues.

Realzado. Ésta es una operación que consiste en embutidos superficiales o moderados, los cuales se hacen con dados macho y hembra coincidentes poco profundos (figura

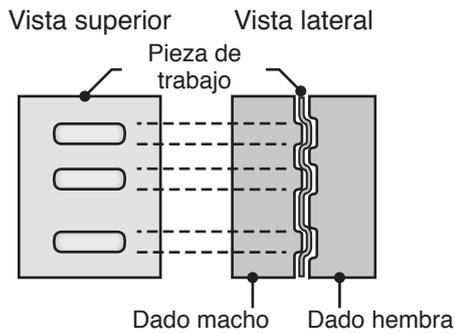


FIGURA 16.39 Operación de realzado con dos dados; mediante este proceso, pueden producirse letras, números y diseños en piezas de lámina metálica.

16.39). El realzado se utiliza principalmente para reforzar paneles de lámina plana y para decoración y creación de números y letras.

Herramientas y equipos para el embutido. Los materiales más comunes para fabricar herramientas y dados de embutido profundo son aceros grado herramienta y fundiciones, también incluyen dados hechos a partir de fundición dúctil de hierro que se producen mediante un proceso de espuma perdida (sección 11.3.1). También pueden utilizarse otros materiales, como carburos (vea la tabla 5.7). Los métodos para la fabricación de matrices y dados se describen en la sección 14.7. Debido a la forma generalmente simétrica con respecto al eje de los componentes del punzón y la matriz, por ejemplo en la manufactura de latas y recipientes cilíndricos, estos pueden fabricarse en equipos como el maquinado a altas velocidades en tornos controlados por computadora (sección 25.5).

El equipo utilizado para el embutido profundo suele ser una *prensa hidráulica de doble acción* o una prensa mecánica, esta última suele verse favorecida por su velocidad de funcionamiento superior. En la prensa hidráulica de doble acción, el punzón y el pisador se controlan de manera independiente. Por lo general, las aceleraciones del punzón oscilan entre 0.1 y 0.3 m/s (20 y 60 pies/min).

CASO DE ESTUDIO 16.2 Manufactura de latas para alimentos y bebidas

La manufactura de latas es una industria importante y competitiva, con aproximadamente 100 mil millones de latas para bebidas y 30 mil millones de latas para alimentos producidas cada año solamente en Estados Unidos. Estos recipientes son resistentes y ligeros —típicamente con pesos menores a 0.5 onzas y bajo una presión interna de 90 psi— confiables y sin fugas de su contenido. Existen requisitos estrictos para el acabado superficial de una lata puesto que los recipientes con decoración y brillo agradables son preferibles a latas con aspecto opaco. Teniendo en cuenta todas estas características, las latas de metal son muy baratas. Los fabricantes de latas pueden cobrar aproximadamente 40 dólares por 1000 latas, o alrededor de 4 centavos por lata.

Las latas para alimentos y bebidas pueden producirse de varias maneras, las más comunes son en dos y en tres piezas. Las latas de dos piezas consisten en el cuerpo y la tapa de la lata (figura 16.40a). El cuerpo se hace de una sola pieza que se ha embutido y planchado, de ahí la práctica de la industria de referirse a este estilo como latas D&I (*drawn and ironed*, embutido y planchado). Las latas de tres piezas se fabrican uniendo una tapa y una base a un cuerpo cilíndrico de lámina metálica, lo cual generalmente se hace mediante el formado de una costura sobre un formato de lámina metálica.

Los cuerpos de lata embutidos y planchados se producen a partir de cierto número de aleaciones, pero las más comunes son aluminio 3004-H19 y acero ASTM A623 con recubrimiento de estaño. Las tapas de aluminio se utilizan para latas tanto de acero como de aluminio y

se producen a partir de aluminio 5182-H19 o 5182-H48. La tapa tiene un demandante conjunto de requisitos de diseño, como se puede apreciar al revisar la figura 16.40b. La tapa no sólo debe *marcarse* con facilidad (hendiduras curvas alrededor de la ficha), sino que también se le aplica un remache integral y un cabeceado (sección 14.4) para mantener la ficha en su lugar. La aleación de aluminio 5182 tiene, entre sus características únicas, la suficiente formabilidad como para permitir la configuración del remache integral sin agrietarse y la capacidad de poder ser marcada. Las tapas, básicamente, se estampan a partir de láminas de aluminio 5182, el tapa abatible superior está marcado y alrededor de la periferia interior de la tapa se coloca un sello de plástico. La capa de polímero sella el contenido de la lata después de que la tapa se cose al cuerpo de la lata, como se describe a continuación.

El método tradicional para la fabricación de los cuerpos de lata se muestra en la figura 16.31. El proceso inicia con discos de 5.5 pulg de diámetro producidos a partir de hojas laminadas del material. Los discos (a) se *embuten profundamente* hasta un diámetro de unas 3.5 pulg, (b) se *reembuten* hasta un diámetro final de alrededor de 2.6 pulg, (c) se *planchan* a través de dos o tres anillos de planchado en una sola pasada y (d) se *forma un domo* para conformar la parte inferior de la lata. Las operaciones de embutido profundo y planchado se realizan en un tipo especial de prensa, la cual suele producir latas a velocidades de más de 400 carreras por minuto. Después de esta serie de operaciones, se realiza cierta cantidad de procesos adicionales.

(continúa)

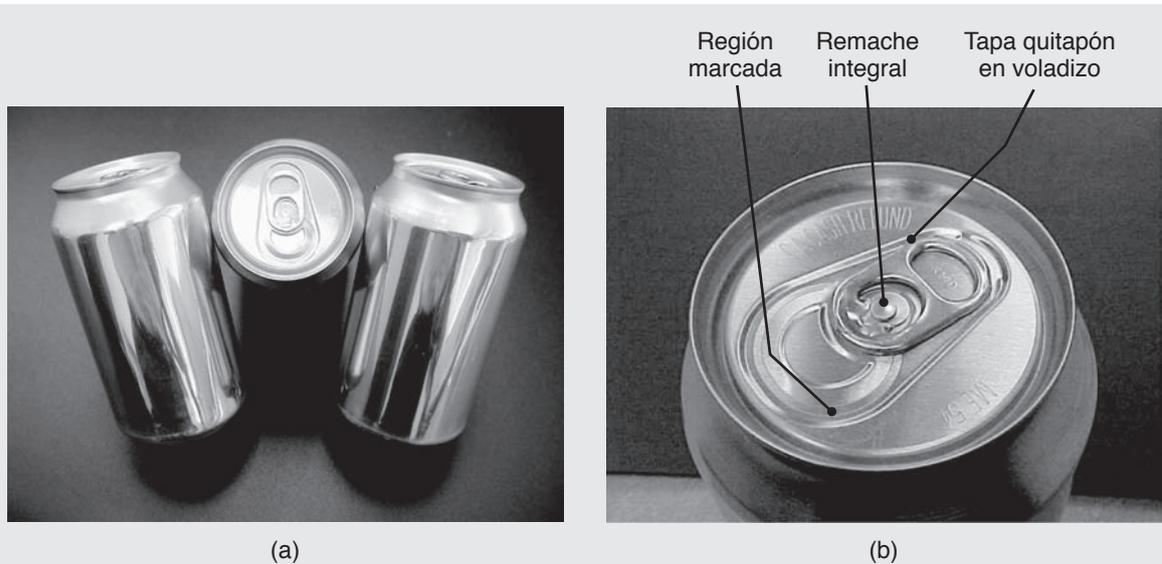


FIGURA 16.40 (a) Latas de aluminio para bebidas, note la superficie lisa. (b) Detalle de la tapa de la lata que muestra el remache integral y los bordes marcados en la tapa abatible.

El estrangulamiento del cuerpo de la lata se lleva a cabo mediante rechazado (sección 16.9) o bien por dado de rebaje (una operación de formado similar a la mostrada en la figura 15.21a, donde una pieza tubular de pared delgada se empuja dentro del dado) y luego se brida por girado. La razón del formado de cuello en la parte superior de una lata es que el aluminio 5182 utilizado para la tapa es relativamente caro; por ello conviene estrechar la parte alta de la lata ya que así la

tapa requiere menor volumen y se reduce el costo en material. También debe señalarse que el costo de una lata se calcula frecuentemente hasta millonésimas de dólar, por lo que cualquier característica de diseño que reduzca el costo puede ser explotada por esta competitiva industria.

Fuente: Impreso con autorización de J. E. Wang, Texas A & M University.

16.8 Formado de hule e hidroformado

En los procesos descritos en las secciones anteriores, se ha indicado que los dados suelen estar hechos de materiales fuertes, como aceros y carburos. En el *formado de hule* (también conocido como *proceso de Guerin*), uno de los dados de un juego de dados está hecho a partir de un material flexible, por lo general una membrana de poliuretano. Los poliuretanos se usan ampliamente debido a su resistencia a la abrasión, a la fatiga y al corte o a la rasgadura (sección 7.9).

En el doblado y realzado de láminas metálicas mediante este proceso, el dado hembra se sustituye por una almohadilla de hule (figura 16.41). Observe que la superficie exterior de la lámina está protegida contra daños o rayones porque no entra en contacto directo con la dura superficie del metal durante el formado. Las presiones en el formado de hule suelen ser del orden de 10 MPa (1500 psi).

En el **hidroformado** o *proceso de formado con fluidos* (figura 16.42), la presión sobre la membrana de hule se controla durante todo el ciclo de formado, donde la presión máxima es de hasta 100 MPa (15 000 psi). Este procedimiento permite mantener un estrecho control sobre la pieza durante la operación y evita la formación de pliegues o desgarramientos. En el hidroformado se obtienen embutidos más profundos que en el embutido profundo convencional porque la presión ejercida alrededor de la membrana de hule fuerza la copa contra el punzón. Como resultado, aumenta la fricción en la interfase punzón-copa, lo que a su vez reduce los esfuerzos de tensión longitudinales en la copa y, por lo tanto, retrasa la fractura.

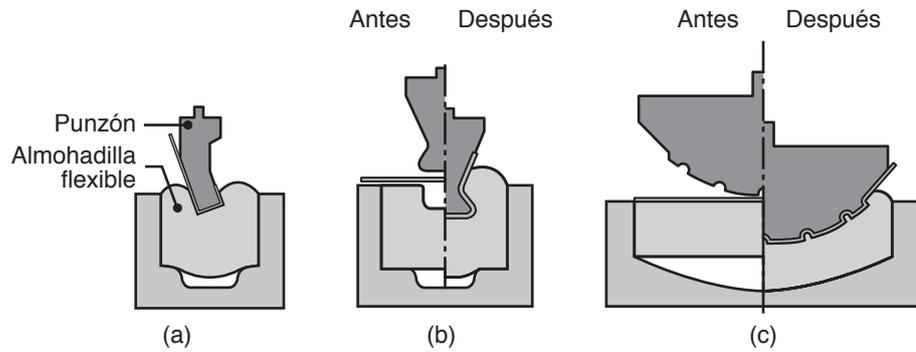


FIGURA 16.41 Ejemplos de doblado y realzado de láminas metálicas con un punzón de metal y una almohadilla flexible que sirve como dado hembra. Fuente: Cortesía de Polyurethane Products Corporation.

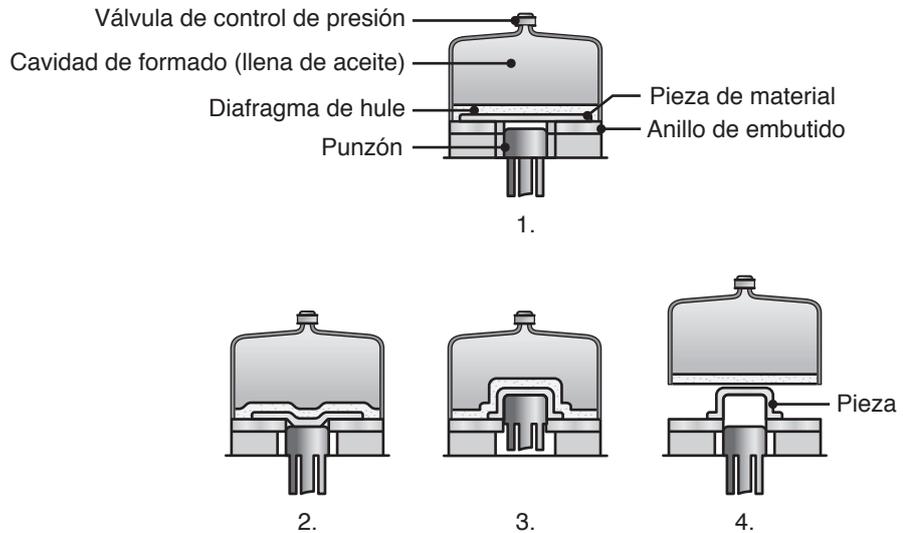


FIGURA 16.42 Proceso de hidroformado (o formado con fluidos); observe que, a diferencia del proceso de embutido profundo ordinario, la presión ejercida en el domo fuerza las paredes de la copa contra el punzón. La copa viaja con el punzón; de esta manera, se mejora la capacidad de embutido profundo.

El control de las condiciones de fricción en el formado de hule, así como en otras operaciones del formado de láminas, puede ser un factor crítico en la fabricación exitosa de piezas. El uso de los lubricantes apropiados y su método de aplicación también son importantes.

En el **hidroformado de tubos** (figura 16.43a), los tubos de metal se forman en una matriz y se presurizan internamente mediante un fluido, generalmente agua. Con este proceso, que ya se está aplicando más ampliamente, pueden formarse de buena manera tubos simples o diversos perfiles huecos intrincados (figura 16.43b). Las piezas que se fabrican incluyen componentes estructurales automotrices de escape y tubulares.

Cuando se seleccionan adecuadamente, los procesos de formado de hule e hidroformado tienen como ventajas (a) la capacidad para formar perfiles complejos, (b) la formación de piezas con hojas laminadas hechas de diversos materiales y recubrimientos, (c) la flexibilidad y facilidad de operación, (d) la no ocurrencia de daños en las superficies de la lámina, (e) un bajo desgaste de los dados o matrices y (f) un bajo costo de las herramientas.

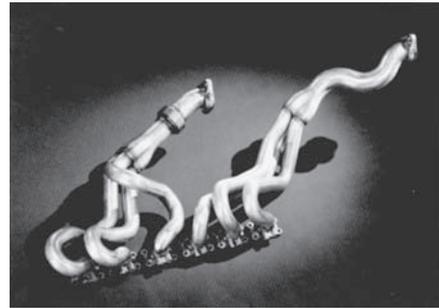
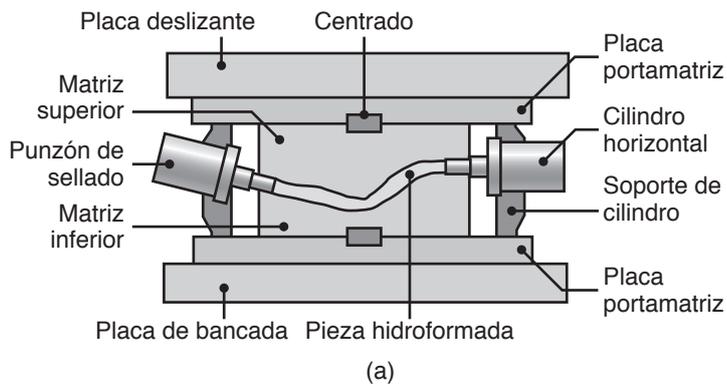


FIGURA 16.43 (a) Ilustración esquemática del proceso de hidroformado de tubos. (b) Ejemplo de piezas tubulares hidroformadas. A través del hidroformado de tubos, se producen componentes automotrices de escape y estructurales, cuadros de bicicleta y accesorios hidráulicos y neumáticos. Fuente: Cortesía de Schuler GmbH.

CASO DE ESTUDIO 16.3 Hidroformado de tubo para el soporte de un radiador automotriz

El ensamble convencional que se utiliza para dar soporte a un radiador de automóvil, o marco del radiador, se construye a través del estampado de los componentes, que posteriormente se sueldan entre sí. Para simplificar el diseño y lograr un ahorro en el peso, se diseñó un ensamble hidroformado, como se muestra en la figura 16.44. Observe que este diseño utiliza diferentes secciones transversales, una característica importante para reducir el peso y proporcionar superficies que faciliten el ensamble y montaje del radiador.

Una secuencia típica para el proceso de hidroformado de tubos consta de los siguientes pasos:

1. Doblado del tubo hasta la configuración deseada.

2. Hidroformado del tubo para lograr la forma deseada.
3. Operaciones de acabado, como el corte final y la inspección.
4. Ensamble, incluyendo la soldadura de los componentes.

En la figura 16.45 se muestran las operaciones realizadas sobre uno de los componentes del tubo del soporte. El tubo, construido de acero con una resistencia a la cedencia de 300 MPa (43.5 ksi), se dobla para obtener la forma (vea la figura 16.27). Después, el tubo curvo se coloca en una prensa de hidroformado y se le añaden las tapas de los extremos.



FIGURA 16.44 Hidroformado de un soporte de radiador automotriz que sirve como marco para el montaje del radiador.

(continúa)

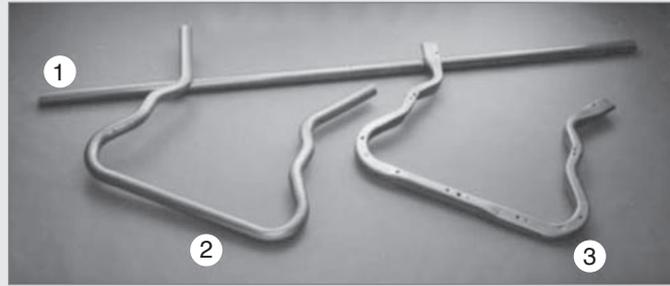
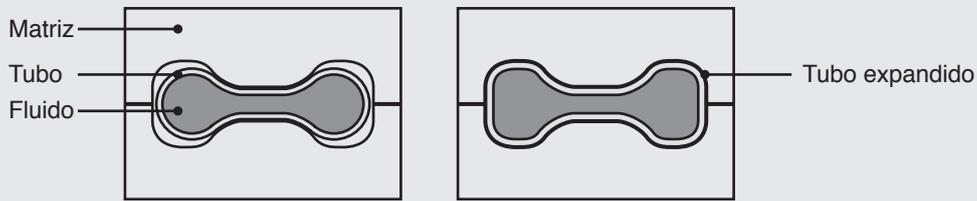
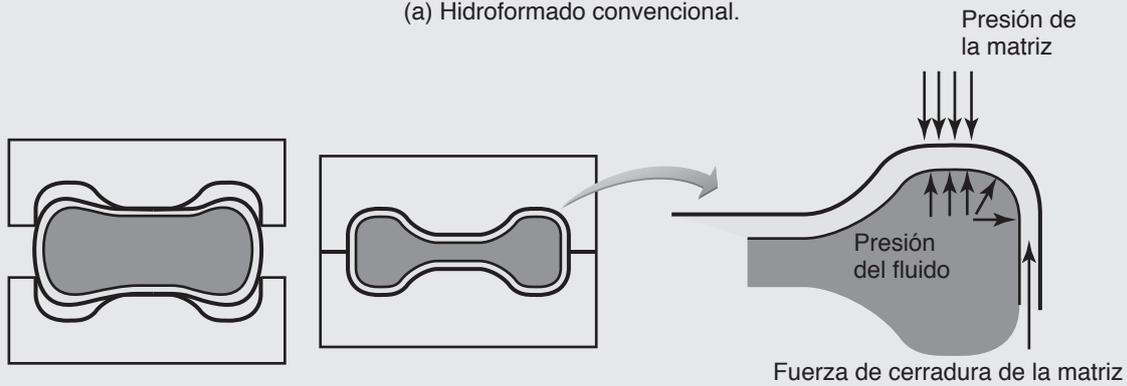


FIGURA 16.45 Secuencia de operaciones en la producción de un componente de tubo hidroformado: (1) tubo cortado a la longitud deseada; (2) tubo después del doblado y (3) tubo después del hidroformado.



1. La matriz se cierra sobre el tubo.
2. El tubo se expande y toma la forma de la cavidad de la matriz.

(a) Hidroformado convencional.



1. La matriz está parcialmente cerrada; la baja presión fuerza al tubo a llenar parcialmente la cavidad.
2. La fuerza de cerradura de la matriz y la baja presión actúan para forzar la entrada del tubo en la cavidad; los esfuerzos presentes en las esquinas se dominan por flexión para mejorar la formabilidad.

(b) Hidroformado por secuencia de presión.

FIGURA 16.46 Ilustración esquemática de la expansión de un tubo hasta una sección transversal deseada mediante (a) el hidroformado convencional y (b) el hidroformado por secuencia de presión.

El hidroformado convencional implica cerrar la matriz sobre el tubo y aplicar enseguida una presurización interna para forzar el tubo hasta la forma deseada. La figura 16.46a muestra una sección transversal típica. Observe que a medida que el tubo se expande, no hay adelgazamiento significativo de la pared, especialmente en las esquinas, debido a la fricción presente

en la superficie de contacto del tubo con la matriz. Por consiguiente, se usa una secuencia de presiones que optimizan la formación de las esquinas, como se muestra en la figura 16.46b.

En este enfoque, se aplica una primera etapa de presión (etapa de presión previa) cuando la matriz se está cerrando, lo cual hace que el tubo llene parcialmente la

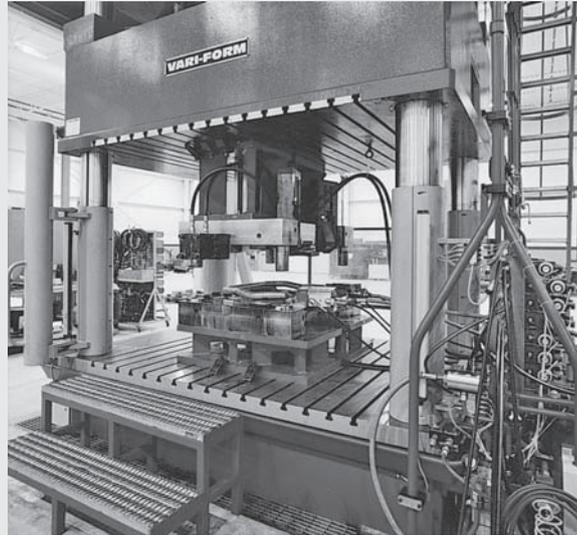


FIGURA 16.47 Vista de una prensa para hidroformado de tubos con el tubo doblado en posición mediante una matriz de formado.

cavidad de la matriz y forme las esquinas de la sección transversal. Después de que la matriz está completamente cerrada, la presión interna se incrementa para asegurar la forma y proporcionar el soporte necesario para la perforación de agujeros. Esta secuencia tiene la ventaja de formar esquinas agudas por flexión en la sección transversal, a diferencia del estiramiento puro como en el hidroformado convencional. El grosor de pared resultante es mucho más uniforme, lo que produce un componente más sano estructuralmente. La figura 16.47 muestra una pieza que se está hidroformando en una prensa.

El ensamble que se muestra en la figura 16.44 tiene 76 agujeros que se perforan en el interior de la matriz

de hidroformado, después los extremos se cortan a la medida. Los 10 componentes del soporte hidroformado se ensamblan mediante soldadura por arco metálico a gas, operada en forma robótica (vea la sección 30.4.3) y usando sujetadores roscados para ayudar en el servicio.

En comparación con el diseño original estampado, el diseño hidroformado tiene cuatro componentes menos, utiliza sólo 20 soldaduras en vez de las 174 necesarias para el diseño estampado y pesa 10.5 kg (23 libras) contra 14.1 kg (31.1 lb). Por otra parte, la rigidez de la caja y las áreas de enfriamiento del agua aumentan de manera significativa.

Fuente: Cortesía de B. Longhouse, Vari-Form, Inc.

16.9 Rechazado

El *rechazado* es un proceso que implica la formación de piezas axisimétricas sobre un mandril utilizando diversas herramientas y rodillos; es un proceso similar al del trabajo con arcilla en un torno de alfarero.

Rechazado convencional. En el *rechazado convencional*, una pieza en forma de disco, hecha de lámina metálica plana o preformada, se coloca y sostiene contra un mandril, luego se hace girar mientras una herramienta rígida moldea el material sobre el mandril (figura 16.48a). La herramienta puede activarse manualmente o, para tasas de producción más altas, con mecanismos controlados por computadora. El proceso implica una serie de pasos y requiere mucha habilidad. El rechazado convencional es particularmente adecuado para la fabricación de formas cónicas y curvilíneas (figura 16.48b) —con diámetros de las piezas que llegan hasta los 6 m (20 pies)— cuya producción sería difícil o poco económica de otro modo. Aunque la mayor parte del rechazado se lleva a cabo

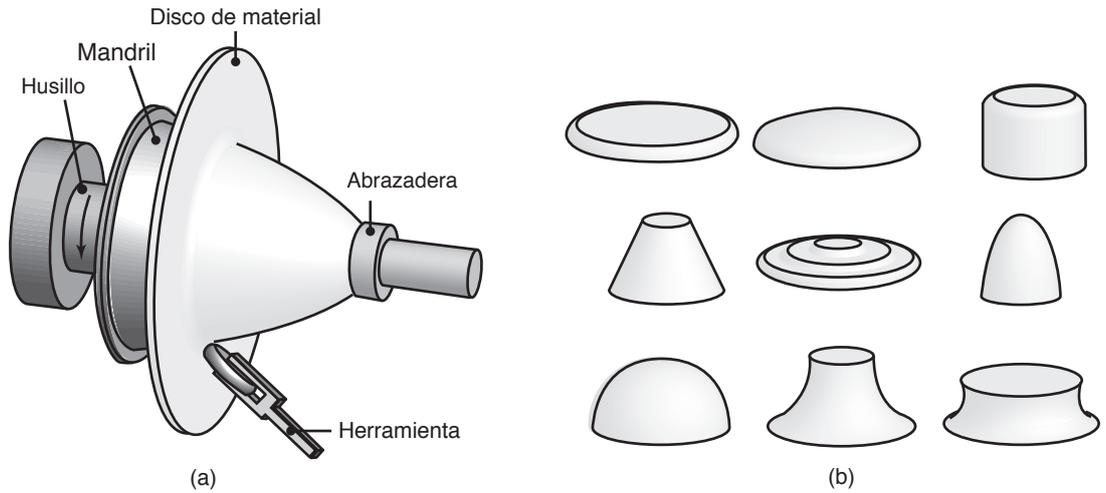


FIGURA 16.48 (a) Ilustración esquemática del proceso de rechazado convencional. (b) Tipos de piezas rechazadas convencionalmente. Todas las piezas son axisimétricas.

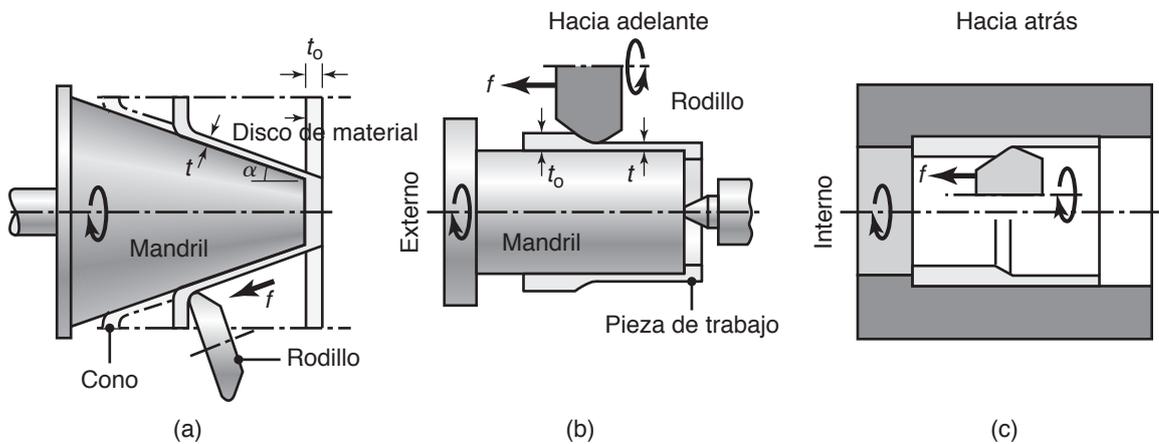


FIGURA 16.49 (a) Ilustración esquemática del proceso de rechazado de corte para la fabricación de piezas cónicas; el mandrill puede configurarse de manera que las piezas curvilíneas se puedan formar. (b) y (c) Ilustraciones esquemáticas del proceso de rechazado de tubos.

a temperatura ambiente, piezas gruesas y metales con alta resistencia o baja ductilidad requieren rechazado a temperaturas elevadas.

Rechazado por cizallamiento. También conocida como *rechazado motorizado*, *torneado de flujo*, *hidrorrechazado* y *forjado de rotación*, esta operación produce una forma axisimétrica cónica o curvilínea, reduciendo el grosor de la lámina, mientras mantiene el diámetro de la pieza en bruto (figura 16.49a). Puede usarse un solo rodillo de formado, pero se prefieren dos rodillos con el fin de equilibrar las fuerzas radiales que actúan sobre el mandrill. Las piezas típicas que se fabrican son las cubiertas de los motores para cohete y los conos de ojiva para misiles. Mediante el rechazado por cizallamiento pueden formarse piezas de hasta 3 m (10 pies) de diámetro. Esta operación produce pocos residuos de material y puede completarse en un tiempo relativamente corto, en algunos casos requiere sólo de unos pocos segundos. Es posible obtener una diversidad de formas con herramientas bastante simples que, por lo general, están hechas de acero para herramientas.

La capacidad de un metal de ser formado mediante el proceso de rechazado, “*rechazabilidad*”, suele definirse como la reducción máxima de grosor a la que una pieza puede someterse por rechazado sin sufrir fractura. Se ha encontrado que la rechazabilidad está relacionada con la reducción de área en tensión del material, de igual modo que la capacidad para doblarse (vea la figura 16.18). Por lo tanto, si un metal tiene una reducción tensil del área de 50% o superior, su grosor puede reducirse, en una sola pasada, en tanto como 80%. Para los metales con baja ductilidad, la operación se lleva a cabo a temperaturas elevadas mediante el calentamiento del disco de material en un horno y su transferencia al mandril.

Rechazado de tubos. En el *rechazado de tubos*, el grosor de las piezas de trabajo, huecas y cilíndricas, se reduce o conforma haciéndolas girar en un mandril redondo utilizando rodillos (figuras 16.49b y c). Esta operación es capaz de producir diversos perfiles externos e internos a partir de piezas cilíndricas con espesor de pared constante. Las piezas se pueden girar *hacia adelante* o *hacia atrás*. La reducción máxima del espesor en cada pasada durante el rechazado del tubo se relaciona con la reducción de área en tensión del material, como en el rechazado de corte. El rechazado de tubos puede utilizarse para hacer piezas de cohetes, misiles y motores de reacción, recipientes a presión y componentes automotrices, como ruedas para automóviles y camiones.

Formado incremental. *Formado incremental* es un término que se aplica a una clase de procesos que están relacionados con el rechazado de metal convencional. La versión más simple es la *expansión por estiramiento incremental* (que se muestra en la figura 16.50a), en la que el disco de material que está girando se deforma por medio de una barra de acero con una punta semiesférica lisa para producir piezas con simetría axial. No se utilizan herramientas o mandriles especiales y el movimiento de la barra determina la forma de la pieza final, hecha en una o más pasadas. Una lubricación adecuada resulta esencial.

El **formado incremental CNC** utiliza una máquina herramienta de control numérico por computadora (vea la sección 37.3) programada para seguir contornos a diferentes profundidades a través de la superficie de la lámina. El disco de material se sujeta y permanece fijo y la herramienta de formado gira. Las trayectorias de la herramienta se calculan de manera similar a las del maquinado (parte IV de este libro), utilizando un modelo CAD de la forma deseada como punto de partida (vea la figura 20.2). La figura 16.50b representa un ejemplo de una pieza que se produce mediante formado incremental CNC. Note que la pieza no tiene que ser simétrica al eje. Las ventajas principales del formado incremental CNC son los bajos costos de las herramientas y la alta flexibilidad de las formas que pueden producirse. Este proceso ha sido utilizado para el prototipado rápido de piezas de lámina metálica (vea el capítulo 20). Los inconvenientes principales del formado incremental incluyen las bajas tasas de producción y las limitaciones relativas a los materiales que pueden formarse.

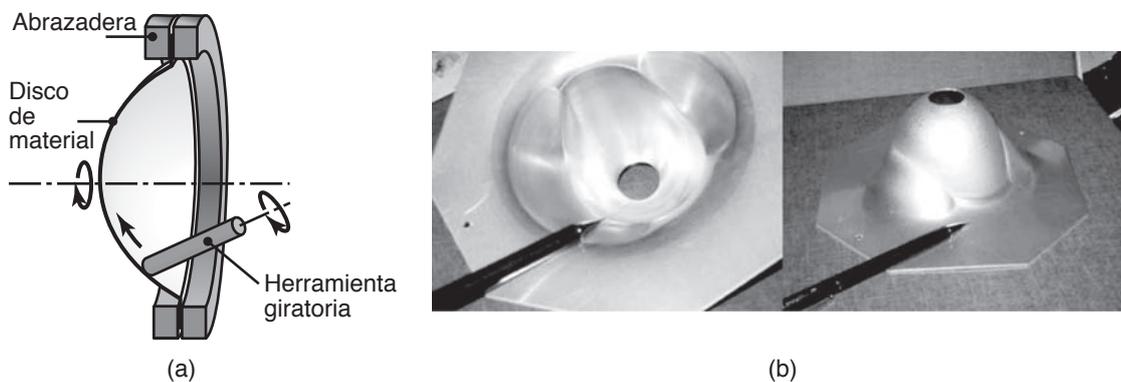


FIGURA 16.50 (a) Ilustración de una operación de formado incremental; observe que no se utiliza ningún mandril y que la forma de la pieza final depende de la trayectoria de la herramienta giratoria. (b) Reflector del faro de un automóvil producido mediante formado incremental CNC. Note que la pieza no tiene que ser simétrica al eje. Fuente: Cortesía de J. Jeswiet, Queen’s University, Ontario.

16.10 Formado superplástico

El comportamiento superplástico de ciertos metales y aleaciones, que se describe en la sección 2.2.7, implica elongaciones por tensión de hasta 2000% exhibidas dentro de ciertos rangos de temperatura. Ejemplos de estos materiales son las aleaciones de zinc y aluminio y las de titanio con granos muy finos, típicamente menores a 10 o 15 μm (vea la tabla 1.1). Las aleaciones superplásticas pueden formarse en perfiles complejos mediante el *formado superplástico* (SPF, por sus siglas en inglés), un proceso que emplea técnicas comunes del trabajo con metales, así como por medio de técnicas de procesamiento de polímeros (como el termoformado, moldeo al vacío y moldeo por soplado que se describen en el capítulo 19). En el SPF, el comportamiento del material es similar al de la goma de mascar o del vidrio caliente, que, cuando se soplan, pueden expandirse muchas veces su diámetro original antes de estallar.

Las aleaciones superplásticas, en particular Zn-22Al y Ti-6Al-4V, también pueden formarse mediante procesos de deformación volumétrica, incluyendo el forjado a troquel cerrado, acuñando, punzonado de cavidades y la extrusión. Los materiales de los dados comúnmente utilizados en el SPF son aceros de baja aleación, aceros para herramientas de fundición, cerámicos, grafito y yeso de París. Su selección depende de la temperatura de formado y de la resistencia de la aleación superplástica.

La muy alta ductilidad y resistencia relativamente baja de las aleaciones superplásticas ofrecen las siguientes ventajas:

- Es posible formar perfiles complejos a partir de una sola pieza, con detalles finos, tolerancias estrechas y eliminación de operaciones secundarias.
- Los ahorros en peso y material pueden ser significativos debido a la buena capacidad de formabilidad de los materiales.
- En las piezas formadas, se presentan pocos o ningún esfuerzos residuales.
- Debido a la baja resistencia del material a las temperaturas de formado, la herramienta puede estar hecha con materiales con menor resistencia que aquéllos empleados para otros procesos metalúrgicos; por lo tanto, los costos de la herramienta son más bajos.

Por otro lado, el formado superplástico tiene las siguientes limitaciones:

- El material no debe ser superplástico a las temperaturas de servicio, de lo contrario la pieza sufrirá cambios de forma durante su uso.
- Debido a la alta sensibilidad a la velocidad de deformación del material superplástico (vea la sección 2.2.7), éste debe formarse a velocidades de deformación lo suficientemente bajas, típicamente de 10^{-4} a 10^{-2} /s. El rango de los tiempos del formado oscila desde unos pocos segundos hasta varias horas; por lo tanto, los tiempos de ciclo son mucho más largos que los de los procesos convencionales de formado y, en consecuencia, el SPF es un proceso de formado por lotes.

Unión por difusión/formado superplástico. La fabricación de estructuras de lámina metálica complejas mediante la combinación de la *unión por difusión* y el *formado superplástico* (SPF/DB, por sus siglas en inglés) es un proceso importante, en particular para la industria aeroespacial. En la figura 16.51 se muestran las estructuras típicas fabricadas, donde las láminas planas se *unen por difusión* y se forman (sección 31.7). En este proceso, primero se unen por difusión las ubicaciones seleccionadas de las láminas, mientras que el resto de las interfaces permanece sin unir, utilizando una capa de material (*tope de despegue* o *separación*) para evitar la unión. Después, la estructura se expande en un molde (tomando así la forma del molde), por lo general mediante el uso de gas neutro a presión (argón). Estas estructuras tienen altas relaciones de rigidez a peso porque son delgadas y, por diseño, tienen módulos de sección altos. Esta importante característica hace que el proceso descrito sea particularmente atractivo en aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales.

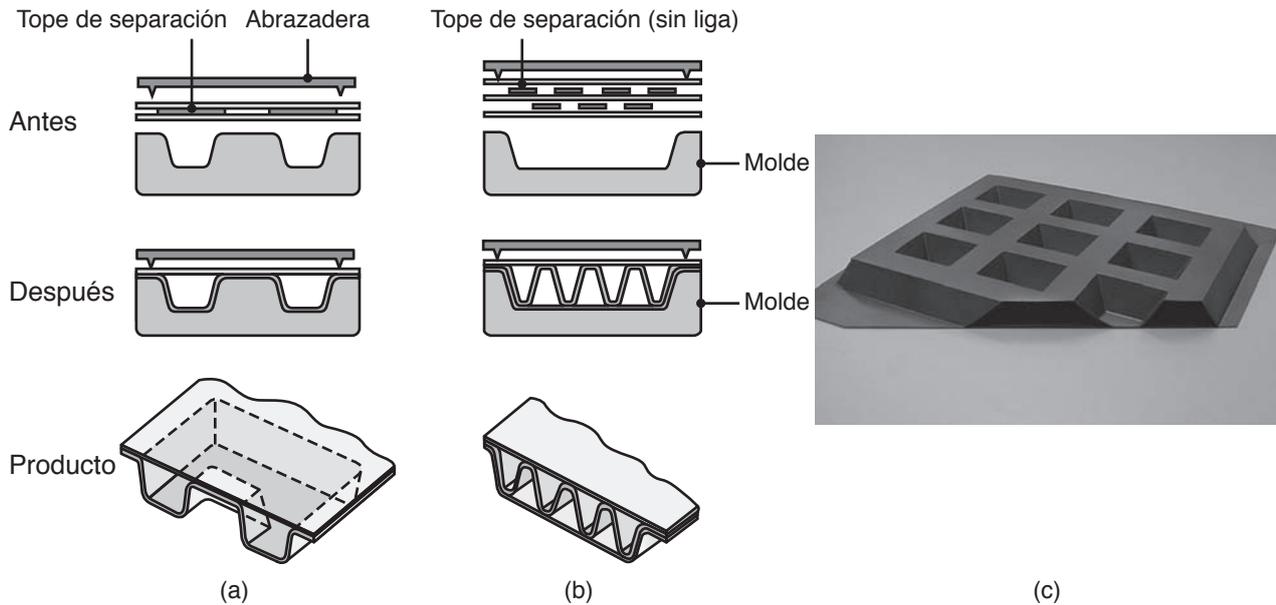


FIGURA 16.51 Tipos de estructuras hechas por formado superplástico y unión por difusión de láminas metálicas; tales estructuras tienen una alta relación de rigidez a peso. Fuente: (a) y (b) Cortesía de Boeing Company. Impreso con autorización. (c) Cortesía de Triumph Group, Inc.

El proceso SPF/DB mejora la productividad, por la eliminación de sujetadores mecánicos, y produce piezas con una buena precisión dimensional y bajos esfuerzos residuales. La tecnología está muy avanzada en las estructuras de titanio para aplicaciones aeroespaciales. Además, se están desarrollando varias aleaciones de aluminio utilizando esta técnica, otros metales para el formado superplástico incluyen diversas aleaciones de níquel.

16.11 Estampado en caliente

El aumento en el rubro de economizar el combustible en los automóviles ha recibido considerable atención en los últimos años, tanto por razones ambientales como por motivos económicos. Para lograr una mayor economía del combustible sin comprometer el rendimiento o la seguridad, los fabricantes aplican cada vez más materiales avanzados en los automóviles. Los componentes de magnesio fundido por inyección en molde o de aluminio extruido son dos ejemplos, pero estos materiales no son lo suficientemente rígidos o tan adecuados como el acero para la seguridad de los ocupantes. Por lo tanto, recientemente ha aparecido una tendencia a considerar el estampado en caliente de aceros avanzados de alta resistencia.

Como se indicó en la sección 5.5.5, se han desarrollado los aceros de alta resistencia TRIP y TWIP, con resistencias a la cedencia y resistencias máximas que pueden superar los 1300 y 2000 MPa, respectivamente (vea la tabla 5.4). El formado convencional de láminas metálicas de estos materiales sería difícil o imposible por causa de las elevadas fuerzas requeridas y la excesiva restitución después del formado. Por estas razones, la lámina metálica se precalienta por encima de 900 °C (normalmente entre 1000 y 1200 °C) y se estampa en caliente. Para prolongar la vida de los dados y templar el material dentro del dado (como se analiza a continuación), la herramienta se mantiene a una temperatura mucho más baja, típicamente entre 400 a 500 °C.

El estampado en caliente permite la explotación de las fases del acero para facilitar la formación y maximizar la resistencia de la pieza. Básicamente, el acero se mantiene

a temperaturas elevadas para formar austenita (vea la sección 4.4), la cual tiene una estructura fcc dúctil a temperaturas elevadas. Cuando se forma y entra en contacto con herramienta mucho más fría, el acero se enfría rápidamente para formar martensita, que es una forma de acero muy duro y fuerte pero quebradizo (sección 4.7).

Una secuencia típica de estampado en caliente consiste en los siguientes pasos:

1. El material se calienta hasta la temperatura de austenización y se *sostiene* o *empapa* durante un tiempo lo suficientemente largo como para asegurar que el temple ocurrirá de manera rápida cuando entre en contacto con el dado, pero no antes. Se utilizan tres medios básicos para calentar las piezas en bruto antes del estampado: hornos de hogar de rodillo, bobinas de calentamiento por inducción y calentamiento por resistencia. Los dos últimos métodos tienen la ventaja de contar con tiempos de empape más cortos, pero no pueden generar temperaturas uniformes en toda la pieza. El tiempo de empape debe optimizarse con el fin de garantizar el enfriamiento adecuado y reducir al mínimo el tiempo de ciclo.
2. Con el fin de evitar el enfriamiento de la pieza antes de formarla, la pieza en bruto debe transferirse a los dados de formado lo más rápidamente posible. El formado debe realizarse rápidamente, antes de que comience la transformación de austenita en martensita.
3. Una vez que se forma la pieza, los dados se mantienen cerrados mientras la pieza se temple, lo cual tarda de 2 a 10 segundos en función del espesor de la lámina, de la temperatura de la lámina y del dado y del material de la pieza de trabajo. La velocidad de enfriamiento debe ser mayor a 27 °C/s para obtener martensita. Por lo tanto, el formado se lleva a cabo en herramientas de acero que tienen canales de enfriamiento integrados con el fin de mantener la temperatura adecuada de las herramientas. Una transformación completa en martensita resulta en las altas resistencias que se dan en la tabla 5.4. Cabe señalar que el templado de austenita a martensita tiene como consecuencia un aumento del volumen, lo cual influye en la distribución de los esfuerzos residuales y en la distorsión de la pieza de trabajo en el formado.

Un desarrollo más reciente consiste en usar *gas caliente a presión* (aire o nitrógeno) como un medio de trabajo para formar el material, algo similar al hidroformado. Este método mejora la formabilidad y, con un control adecuado del proceso, permite alcanzar temperaturas más uniformes de las piezas de trabajo y de las herramientas, con lo que se reducen los esfuerzos residuales y las distorsiones.

Debido a que la pieza está caliente y el templado debe hacerse muy rápidamente, el estampado en caliente suele realizarse sin lubricante y, a menudo, requiere de granallado (sección 26.8) después del formado para eliminar incrustaciones de las superficies de las piezas. El acero también puede recubrirse con una capa de aluminio-silicio para evitar la oxidación y eliminar el paso del chorro de arena. En tal caso, el recubrimiento requiere un tiempo ligeramente más largo de empape con el fin de unirse adecuadamente al sustrato de acero.

El estampado en caliente no se limita a los aceros. Las aleaciones de magnesio ZEK100, AZ31 y ZE10 también son de gran interés debido a su peso ligero; sin embargo, estos materiales tienen formabilidad limitada a temperatura ambiente y, por lo tanto, se estampan hasta en 300 °C. Además, ciertas láminas hechas con alguna aleación de aluminio avanzada se forman a temperaturas elevadas con el fin de alcanzar mejor ductilidad e incluso desarrollar un comportamiento superplástico.

16.12 Procesos de formado especializados

Aunque no se utilizan tan comúnmente como los descritos hasta ahora, existen otros procesos para el formado de láminas metálicas que se usan en aplicaciones especializadas.

Formado explosivo. Los explosivos se utilizan generalmente para demoler edificios, en la construcción de carreteras y con fines destructivos. Sin embargo, el control de su cantidad y forma hace que sea posible usar explosivos como fuente de energía para el

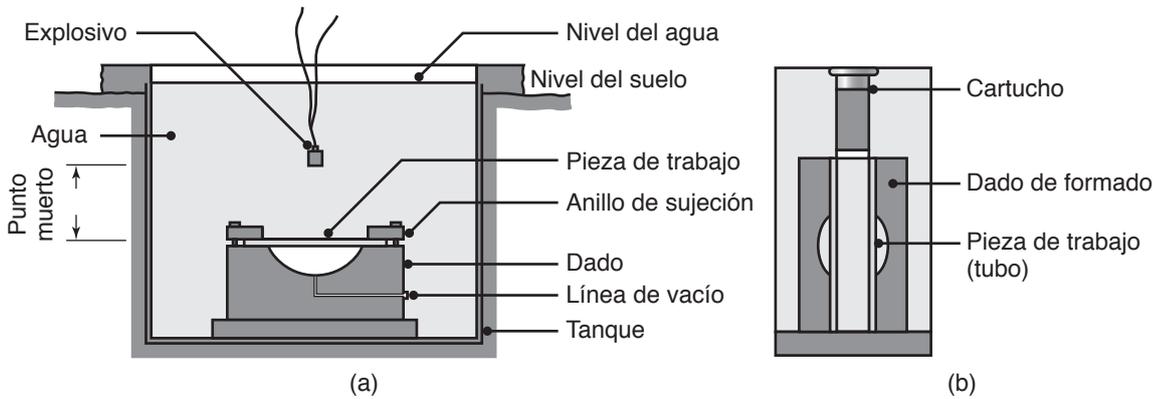


FIGURA 16.52 (a) Ilustración esquemática del proceso de formado explosivo. (b) Ilustración del método confinado para el abombamiento explosivo de tubos.

formado de láminas metálicas. En el *formado explosivo*, el cual se utilizó por primera vez para formar metales a inicios del siglo xx, la pieza de lámina metálica se sujeta sobre un dado y todo el conjunto se sumerge en un tanque lleno de agua (figura 16.52a). Después, el aire presente en la cavidad del dado se evacúa, se coloca una carga explosiva a cierta altura y se hace detonar.

El explosivo genera una onda de choque, desarrollando una presión que es suficiente para el formado de láminas metálicas. El *pico de presión*, p , generado en el agua está dado por la expresión

$$p = K \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^a, \quad (16.15)$$

donde p está en psi; K es una constante que depende del tipo de explosivo, tal como 21 600 para el TNT (trinitrotolueno); W es el peso del explosivo, en libras; R es la distancia del explosivo a la superficie de la lámina metálica (llamada *punto muerto*), en pies, y a es una constante que generalmente se toma como 1.15.

Por medio del formado explosivo es posible formar una variedad de perfiles, siempre que el material sea lo suficientemente dúctil ante las altas velocidades de deformación encontradas en este proceso (vea la tabla 2.4). El proceso es muy versátil puesto que prácticamente no hay ningún límite para el tamaño de la lámina o placa. Resulta especialmente adecuado para bajas corridas de producción de piezas grandes, como las utilizadas en aplicaciones aeroespaciales. Mediante este proceso han sido formadas placas de acero de 25 mm (1 pulg) de espesor y 3.6 m (12 pies) de diámetro, igual que tubos con grosores de pared de hasta 25 mm (1 pulg).

El método de formado explosivo también puede utilizarse a una escala mucho más pequeña, como se muestra en la figura 16.52b. En este caso, se utiliza un *cartucho* (explosivo enlatado) como fuente de energía. El proceso puede ser útil en el abombamiento y la expansión de tubos con pared delgada para aplicaciones especializadas.

Las propiedades mecánicas de las piezas hechas mediante el formado explosivo son básicamente similares a las de las piezas elaboradas por los métodos convencionales de formado. Dependiendo del número de piezas a ser producidas, los dados pueden hacerse a partir de aleaciones de aluminio, acero, hierro dúctil, aleaciones de zinc, concreto reforzado, madera, plásticos o materiales compósitos.

Formado asistido electromagnéticamente. En el *formado asistido electromagnéticamente*, llamado también *formado por impulsos magnéticos*, la energía almacenada en una batería de capacitores se descarga rápidamente a través de una bobina magnética. En un ejemplo típico, una bobina en forma de anillo se coloca sobre una pieza de trabajo tubular. Después, el tubo se colapsa mediante fuerzas magnéticas sobre una pieza sólida, con lo que el ensamble se convierte en una pieza integral (figura 16.53).

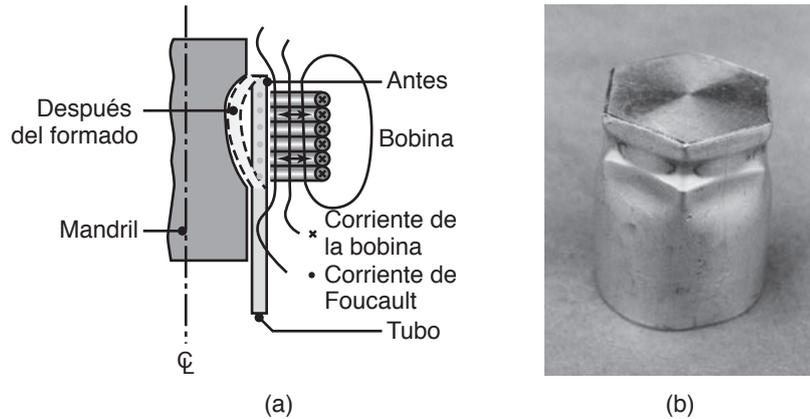


FIGURA 16.53 (a) Ilustración esquemática del proceso de formado por impulso magnético que se utiliza para formar un tubo sobre un tapón. (b) Tubo de aluminio colapsado sobre un tapón hexagonal mediante el proceso de formado por impulso magnético.

La mecánica de este proceso está basada en el hecho de que un campo magnético, producido por la bobina (figura 16.53a), cruza el tubo de metal (que es un conductor eléctrico) y genera *corrientes de Foucault* en el tubo. A su vez, estas corrientes producen su propio campo magnético. Las fuerzas producidas por los dos campos magnéticos se oponen entre sí. Entonces, la fuerza repulsiva generada entre la bobina y el tubo colapsa al tubo sobre la pieza interior. Cuanto mayor sea la conductividad eléctrica de la pieza de trabajo, más altas serán las fuerzas magnéticas. Tenga en cuenta que no es necesario que el material de la pieza tenga propiedades magnéticas, pero sí debe ser conductor de electricidad.

Se ha demostrado que las ventajas básicas de este proceso son que la formabilidad del material se incrementa, la exactitud dimensional se mejora y la restitución y formación de pliegues se reducen. El diseño de la bobina magnética es un factor importante en el éxito de la operación. También pueden hacerse bobinas magnéticas planas para su uso en operaciones como el realzado y el embutido superficial de láminas metálicas.

Utilizado por primera vez en la década de 1960, este proceso ha demostrado ser particularmente eficaz para las aleaciones de aluminio. El formado asistido electromagnéticamente se ha aplicado a (a) el colapso de tubos de pared delgada sobre varillas, cables y tapones; (b) el sellado por compresión rizada en los cartuchos para filtros de aceite automotrices; (c) las operaciones especializadas para el formado de láminas; (d) las operaciones de abombamiento y abocinado, y (e) el estampado de accesorios terminales en tubos de torque para el avión Boeing 777.

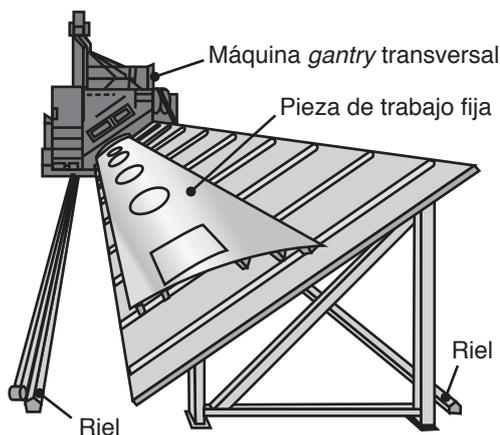


FIGURA 16.54 Ilustración esquemática de una máquina de formado por repujado para dar forma a una pieza grande de lámina metálica, como el revestimiento de un panel para avión; observe que la lámina está fija y que la cabeza de repujado se desplaza por toda su longitud. Fuente: Metal Improvement Company.

Repujado. Como se muestra en la figura 16.54, el repujado se usa para producir curvaturas en láminas metálicas delgadas por *bombardeo con perdigones* (vea la sección 34.2) sobre la superficie de una lámina. Como resultado, la superficie de la lámina se somete a esfuerzos de compresión que tienden a expandir la capa superficial. Debido a que por debajo de la superficie repujada el material permanece rígido, la expansión de la superficie hace que la lámina desarrolle una curvatura. El proceso también induce esfuerzos residuales de compresión en la superficie, los cuales mejoran la resistencia a la fatiga de la lámina metálica.

El repujado se hace con perdigones de hierro fundido o acero descargados desde una rueda giratoria o mediante un chorro de aire desde una boquilla. El repujado se utiliza en la industria aeronáutica para generar curvaturas suaves y complejas en los paneles de las alas de las aeronaves. Se han utilizado perdigones de acero fundido de alrededor de 2.5 mm (0.1 pulg) de diámetro —viajando a una velocidad de

60 m/s (200 pie/s)— para formar paneles laterales de 25 m (80 pies) de largo. Para los perfiles pesados, pueden utilizarse diámetros de perdigón tan grandes como 6 mm (1/4 pulg). El proceso de repujado también se utiliza para *enderezar* piezas torcidas o dobladas, incluyendo anillos abollados para hacerlos redondos.

Formado por rayo láser. Este proceso involucra la aplicación de rayos láser como fuente de calor localizada en regiones específicas de la lámina de metal. Los altos gradientes térmicos desarrollados a través del espesor de la lámina producen esfuerzos térmicos, los cuales son lo suficientemente altos como para causar deformación plástica localizada en la lámina. Con este método, una lámina metálica, por ejemplo, se puede doblar de manera permanente sin necesidad de utilizar troqueles. En el **formado asistido por láser**, el láser actúa como una fuente de calor localizada, reduciendo así la resistencia de la lámina metálica en lugares específicos, mejorando la formabilidad y aumentando la flexibilidad del proceso. Las aplicaciones incluyen enderezado, doblado, abocinado y formado de complejos componentes tubulares o planos.

Microformado. Éste es un desarrollo más reciente e incluye una familia de procesos que se utilizan para producir piezas y componentes metálicos muy pequeños. Los ejemplos de *productos miniaturizados* incluyen un reloj de pulsera con una cámara digital integrada y un componente de almacenamiento informático de un gigabyte. Los componentes típicos hechos por microformado incluyen pequeños ejes para micromotores, resortes, tornillos y toda una variedad de piezas encabezadas en frío, extruidas, dobladas, realzadas, acuña-das, punzonadas o embutidas a profundidad. Las dimensiones se encuentran típicamente en el rango submilimétrico y el peso de las piezas está en el orden de los miligramos.

Formado electrohidráulico. La fuente de energía de este proceso, al que también se le llama *formado por chispa* o *descarga eléctrica bajo el agua*, es una chispa entre dos electrodos conectados por un cable corto y delgado. La descarga rápida de energía, a partir de un juego de capacitores, a través del cable genera una onda de choque en el agua similar a la creada por explosivos. La presión desarrollada en el medio acuoso es lo suficientemente alta para formar la pieza. Los niveles de energía son más bajos que los del formado explosivo, típicamente dentro del rango de unos cuantos kJ. El formado electrohidráulico es un proceso por lotes y puede utilizarse en la fabricación de diversas piezas pequeñas.

CASO DE ESTUDIO 16.4 Manufactura de címbalos (platillos)

Los címbalos (figura 16.55a) son instrumentos de percusión esenciales para todas las formas de música. Los címbalos modernos incluidos en una batería cubren una amplia variedad de sonidos, desde los más profundos y oscuros hasta los más cálidos y brillantes, agudos y cortantes. Algunos címbalos tienen un sonido “musical”, mientras que otros producen sólo “ruido”. Existe una gran variedad de tamaños, formas, pesos, martillos y acabados superficiales (figura 16.55b) para lograr el desempeño deseado.

Los címbalos se producen a partir de metales como el bronce B20 (80% de Cu y 20% de Sn con una traza de plata), bronce B8 (92% de Cu y 8% de Sn), una aleación de níquel-plata y bronce. En la figura 16.56 se muestra la secuencia de manufactura para la producción de un platillo de bronce. El metal B20 se convierte primero en lingotes en forma de hongo y después se enfría a temperatura ambiente. El lingote se lamina su-

cesivamente, hasta 14 veces, con enfriamiento del metal mediante agua en cada pasada a través del tren de laminado. Se presta atención especial al laminado del bronce en un ángulo diferente en cada pasada con el fin de minimizar la anisotropía y desarrollar una forma redonda y pareja. Después, las piezas en bruto laminadas se vuelven a calentar y a formar por extensión (bajo presión) a manera de copa o campana, lo que determina los matices del platillo. Posteriormente, los címbalos se taladran o perforan en su centro para crear orificios de colgado y se recortan en una sierra rotativa hasta los diámetros finales aproximados. Esta operación es seguida por otra etapa de formado por extensión para lograr la forma característica de “platillo turco” que controla la inclinación de la pieza.

El repujado automático se realiza en maquinaria (figura 16.57) y sin plantillas, puesto que los címbalos ya se han formado mediante presión, pero el patrón de

(continúa)

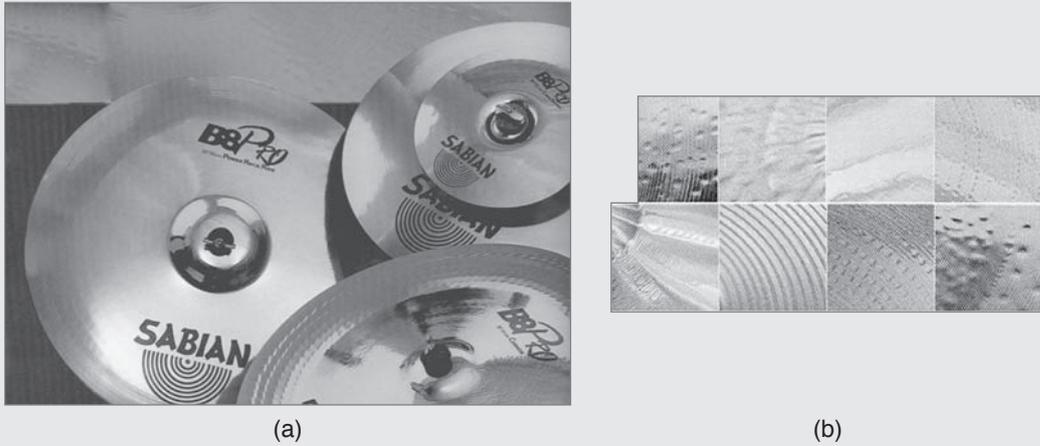


FIGURA 16.55 (a) Címbalos comunes seleccionados. (b) Vista detallada de los diferentes acabados y texturas de los címbalos. *Fuente:* Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

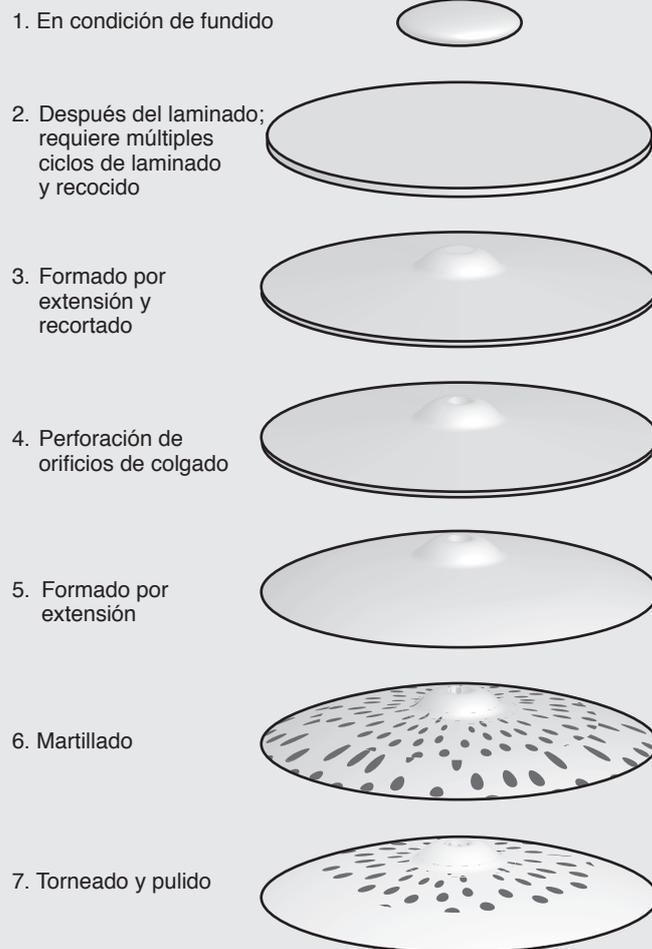


FIGURA 16.56 Secuencia de manufactura para la producción de címbalos. *Fuente:* Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

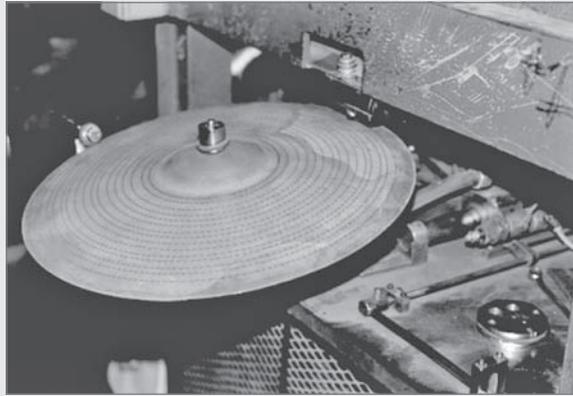


FIGURA 16.57 Martillado automático de un platillo en una máquina de repujado. Fuente: Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

repujado es controlable y uniforme. El tamaño y el patrón de las operaciones de repujado dependen de la respuesta deseada, como el tono, el sonido, la respuesta y el timbre del platillo. Por ello, los címbalos se martillan para darle un carácter distintivo a cada instrumento. El martilleo puede hacerse a mano, lo que implica colocar la pieza de bronce sobre un yunque de acero donde los címbalos se golpean manualmente con martillos.

Sobre los címbalos se realizan diversas operaciones de acabado. Éstas pueden incluir solamente la limpieza y la impresión de la información que los identifique, puesto que algunos músicos prefieren la apariencia natural de la superficie y el sonido del bronce formado por laminado en caliente. De manera más frecuente, los címbalos se trabajan en un torno (sin necesidad de utili-

zar ningún fluido de maquinado) con el fin de eliminar la superficie de óxido y reducir el grosor del platillo, creando el peso y el sonido deseados. En consecuencia, el acabado superficial se hace más brillante y, en algunos casos, también desarrolla una microestructura favorable. Algunos címbalos se pulen hasta alcanzar un “acabado brillante”. En muchos casos, las hendiduras superficiales que resultan del repujado persisten después del acabado, lo cual se reconoce como una característica esencial del funcionamiento del platillo y también es una característica estética apreciada por los músicos. En la figura 16.55b se muestran diversos acabados superficiales asociados con los címbalos modernos.

Fuente: Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

16.13 Manufactura de estructuras metálicas en forma de panel

Una *estructura en forma de panel* se compone, básicamente, de un núcleo de panel, u otra forma corrugada, unida a dos láminas exteriores delgadas (figura 16.58). El ejemplo más común de una estructura de este tipo es el cartón corrugado, el cual tiene una alta relación de rigidez a peso y se utiliza ampliamente en empaques para el envío de mercancías de consumo e industriales. Debido a su peso ligero y a su alta resistencia a la flexión, las estructuras metálicas en forma de panel se utilizan para fabricar componentes aeronáuticos y aeroespaciales, en edificios y en equipos de transporte. Por ejemplo, el chasis del automóvil deportivo Koenigsegg (sueco) se hace parcialmente de paneles de aluminio con un depósito de combustible integrado. Las estructuras de panel también pueden hacerse de materiales no metálicos, como polímeros y diversos materiales compósitos.

Las estructuras de panel se hacen comúnmente de aluminio de la serie 3000, pero también pueden fabricarse en titanio, aceros inoxidable y aleaciones de níquel para aplicaciones especializadas y resistencia a la corrosión. Para hacer estas estructuras, también se utilizan plásticos reforzados como la aramida epóxica.

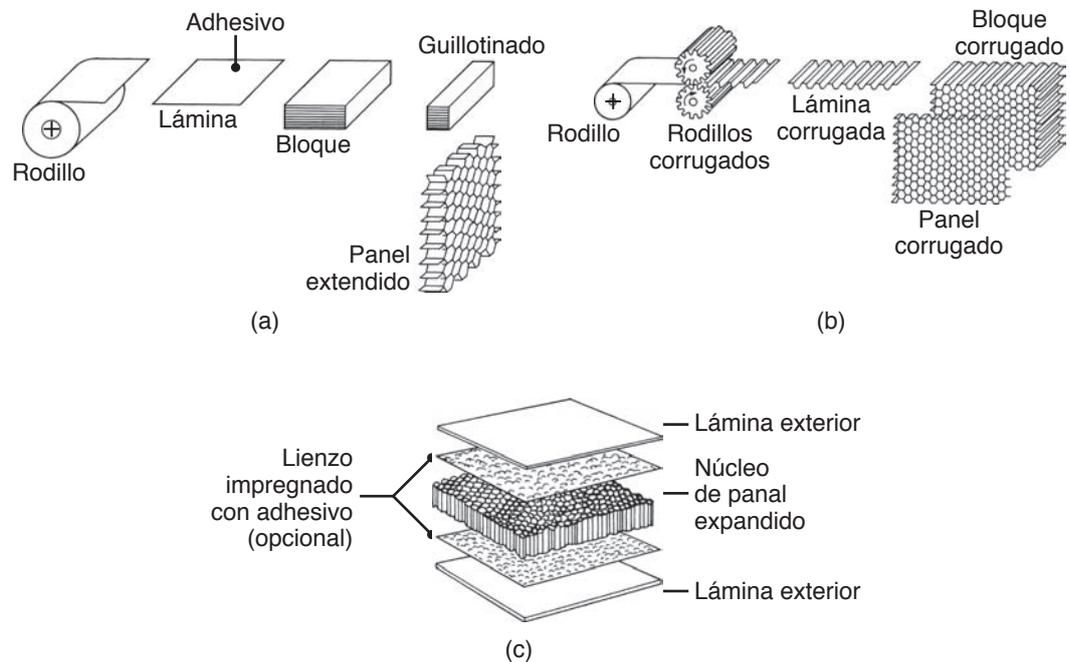


FIGURA 16.58 Métodos de manufactura para estructuras de panel: (a) proceso de expansión, (b) proceso de corrugación y (c) ensamble de una estructura de panel en un laminado.

Existen dos métodos básicos para la manufactura de materiales de panel. En el **proceso de expansión**, que es el método más común (figura 16.58a), primero se cortan las láminas a partir de un rollo y se les aplica un *adhesivo* (vea la sección 32.4) a intervalos (líneas de nodos) en sus superficies. Las láminas se apilan y se curan en un horno, desarrollando así enlaces fuertes en las superficies adhesivas. El bloque se guillotina o rebana a las dimensiones deseadas y se estira para producir una estructura de panel.

En el **proceso de corrugación** (figura 16.58b), la lámina metálica pasa primero a través de un par de rodillos diseñados especialmente, convirtiéndose en una lámina corrugada; ésta se corta luego en las longitudes deseadas. Se aplica adhesivo a las líneas de nodo, las láminas corrugadas se apilan en bloque y éste se cura. Debido a que las láminas ya están preformadas, no se realiza ningún proceso de expansión. Por último, se hace el panel en una estructura de sándwich (figura 16.58c) utilizando láminas exteriores a manera de cara que se unen mediante adhesivos (o *soldadura fuerte*; vea la sección 32.2) a las superficies superior e inferior.

16.14 Consideraciones de diseño en el formado de láminas metálicas

Así como ha sucedido con la mayoría de los procesos descritos en este libro, existen ciertos lineamientos y prácticas de diseño que han evolucionado con el tiempo. El diseño cuidadoso empleando las mejores prácticas de diseño, las herramientas computacionales y las técnicas de manufactura establecidas es el mejor enfoque para lograr diseños de alta calidad y ahorros en costos. Los siguientes lineamientos se aplican a las operaciones de formado de láminas, considerando los problemas de diseño más significativos que se han identificado.

Diseño del formato. El desperdicio de material es la principal preocupación en las operaciones de troquelado (vea también la tabla 40.6). Las piezas diseñadas en forma deficiente no se *anidan* del modo correcto y esto puede generar una cantidad considerable de desperdicio (figura 16.59).

Doblado. Las principales preocupaciones en las operaciones de doblado son la fractura del material, los pliegues y la incapacidad de formar correctamente el doblez. Como se muestra en la figura 16.60, una pieza de lámina metálica con brida obligará a la brida a experimentar compresión, lo que puede causar pandeo (vea también el *bridado*, sección 16.6). El pandeo puede controlarse mediante una muesca de alivio —cortada para limitar los esfuerzos desarrollados durante el doblado— o bien hacerse una modificación de diseño como la mostrada en la figura. Los dobleces en ángulo recto presentan dificultades similares y pueden utilizarse muescas de alivio para evitar que se rompan (figura 16.61).

Debido a que el radio de doblado es un área altamente esforzada, todas las concentraciones de esfuerzo deben retirarse de la ubicación del radio de doblado, por ejemplo los orificios cercanos a las curvas. Resulta ventajoso desplazar el orificio a cierta distancia de la zona de doblado, pero cuando esto no es posible, puede utilizarse una ranura en media luna o una pestaña (figura 16.62a). De igual modo, en las bridas dobladas, deben evitarse las pestañas y muescas porque sus concentraciones de esfuerzo reducirán en gran medida la formabilidad. Cuando se requieran lengüetas, deben usarse radios grandes para reducir la concentración de esfuerzos (figura 16.62b).

Si van a utilizarse muescas, es importante orientarlas de manera adecuada con respecto a la dirección del grano en la lámina metálica. Como se muestra en la figura 16.17, las curvas ideales deben ser perpendiculares a la dirección de laminado de la lámina (u oblicuas, si lo anterior no es posible) con el fin de evitar el agrietamiento. El doblado en radios agudos puede lograrse mediante grabado o realzado (figura 16.63), pero esta operación puede dar lugar a fracturas. En una holgura de doblado no deben existir rebabas (vea la figura 16.16), puesto que son menos dúctiles (debido al endurecimiento por deformación) y pueden conducir al inicio y a la propagación de grietas en el resto de la lámina.

Formado con rodillos. En general, el proceso debe diseñarse con el fin de controlar la restitución. Además, no resulta difícil incluir rodillos de perforación en la línea de formado, por lo que es posible ubicar orificios, muescas o realzados periódicos en el perfil formado con rodillos.

Operaciones de estampado y troqueles progresivos. En los troqueles progresivos, el costo de la herramienta y el número de estaciones se determinan a partir de la cantidad y el espaciado entre las características de una pieza. Por lo tanto, resulta ventajoso mantener el número de características en un mínimo con el fin de minimizar los costos de la herramienta. Las características poco espaciadas pueden proporcionar espacio insuficiente para los punzones y entonces pueden requerirse dos punzones. Estrechos cortes y salientes también pueden presentar dificultades para el formado con un solo juego de punzón y matriz.

Embutido profundo. Después de que una copa se embute a profundidad, de modo invariable retornará ligeramente hacia su forma original. Por esta razón, los diseños que

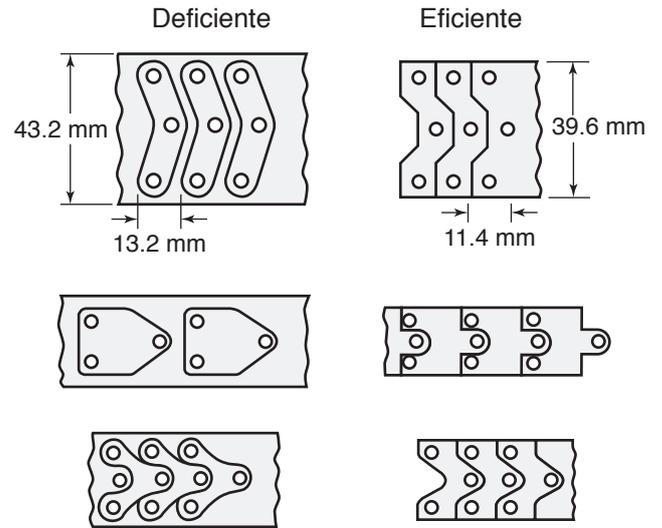


FIGURA 16.59 Anidación eficiente de piezas para la utilización óptima del material en el troquelado. Fuente: Reutilizado con autorización de la Society of Manufacturing Engineers en *Die Design Handbook*, 3a. ed., editado por David Smith.

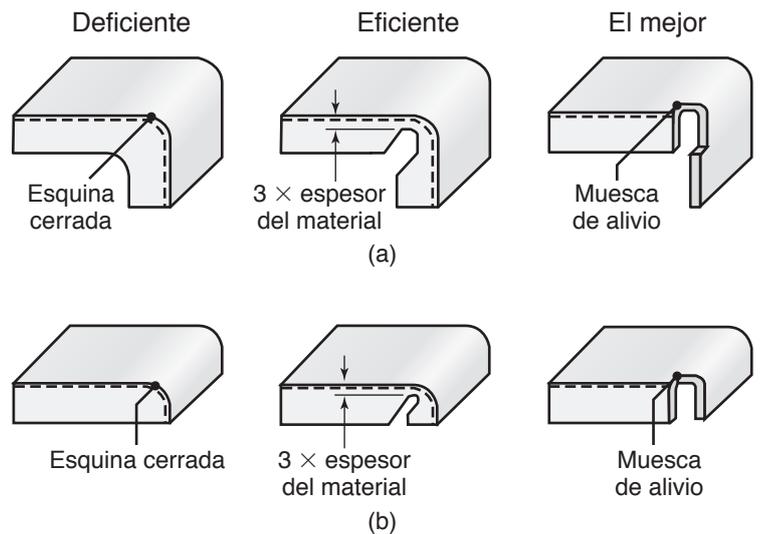


FIGURA 16.60 Control del desgarrado y del pandeo de dos diferentes bridas en un doblado en ángulo recto. Fuente: Reutilizado con autorización de la Society of Manufacturing Engineers en *Die Design Handbook*, 3a. ed., editado por David Smith.

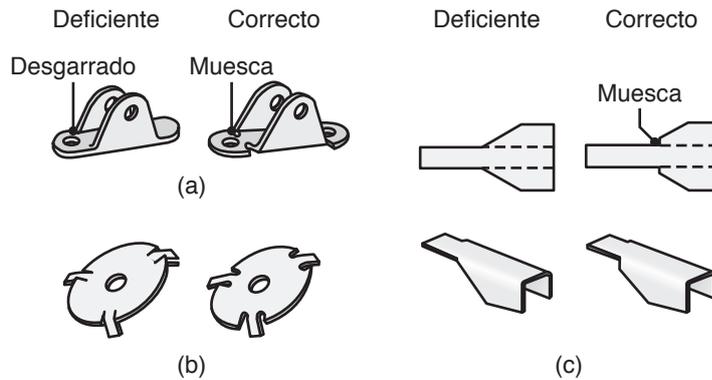


FIGURA 16.61 Aplicación de muescas para evitar el desgarramiento y los pliegues en las operaciones de doblado en ángulo recto. Fuente: Reutilizado con autorización de la Society of Manufacturing Engineers en *Die Design Handbook*, 3a. ed., editado por David Smith.

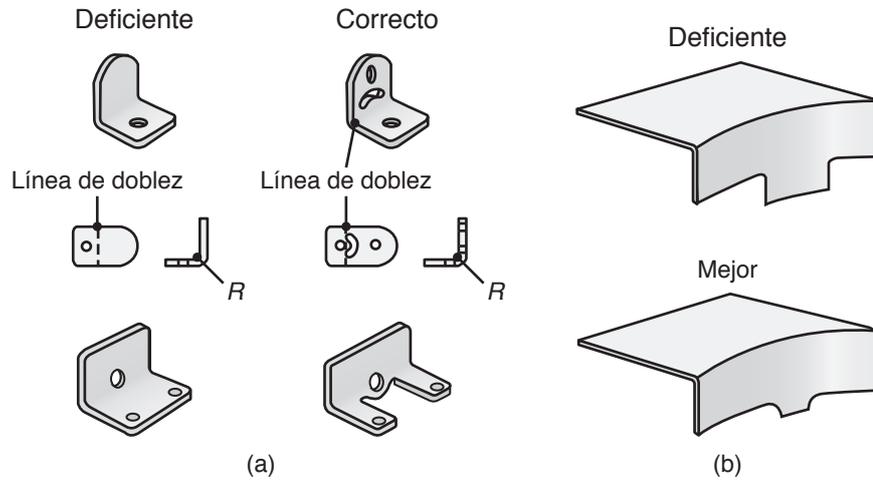


FIGURA 16.62 Concentraciones de esfuerzo cerca de los dobleces. (a) Uso de una media luna u oreja para un orificio cercano a un doblez. (b) Reducción de la severidad de la pestaña en la brida. Fuente: Reutilizado con autorización de la Society of Manufacturing Engineers en *Die Design Handbook*, 3a. ed., editado por David Smith.

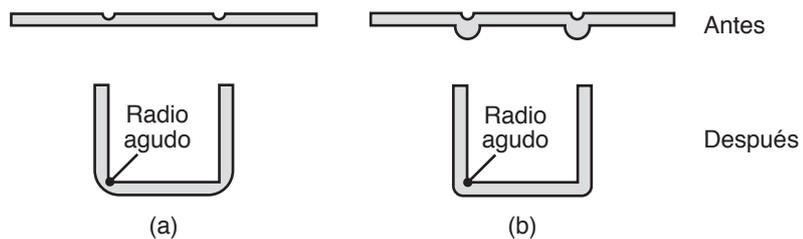


FIGURA 16.63 Aplicación de (a) grabado o (b) realizado para obtener un radio interior agudo en el doblez. A menos que se diseñen adecuadamente, estas características pueden conducir a fracturas. Fuente: Reutilizado con autorización de la Society of Manufacturing Engineers en *Die Design Handbook*, 3a. ed., editado por David Smith.

requieren una pared vertical pueden ser difíciles de elaborar. Los ángulos de alivio de al menos 3° en cada pared son más fáciles de producir. Copas con radios internos agudos son difíciles de producir y las copas profundas suelen requerir una o más operaciones de planchado.

16.15 Equipo para el formado de láminas metálicas

Para la mayoría de las operaciones generales de trabajo a presión, el equipo básico consta de prensas mecánicas, hidráulicas, neumáticas o hidroneumáticas, con una amplia variedad de diseños, características, capacidades y los controles por computadora. Recientemente, se están utilizando las servoprensas (vea la sección 14.8) para el formado de láminas metálicas debido a su capacidad para variar la velocidad y las fuerzas de manera controlada durante el formado. Los diseños típicos para los marcos o bastidores de prensa se muestran en la figura 16.64 (vea también las figuras 14.19 y 16.23f). El diseño

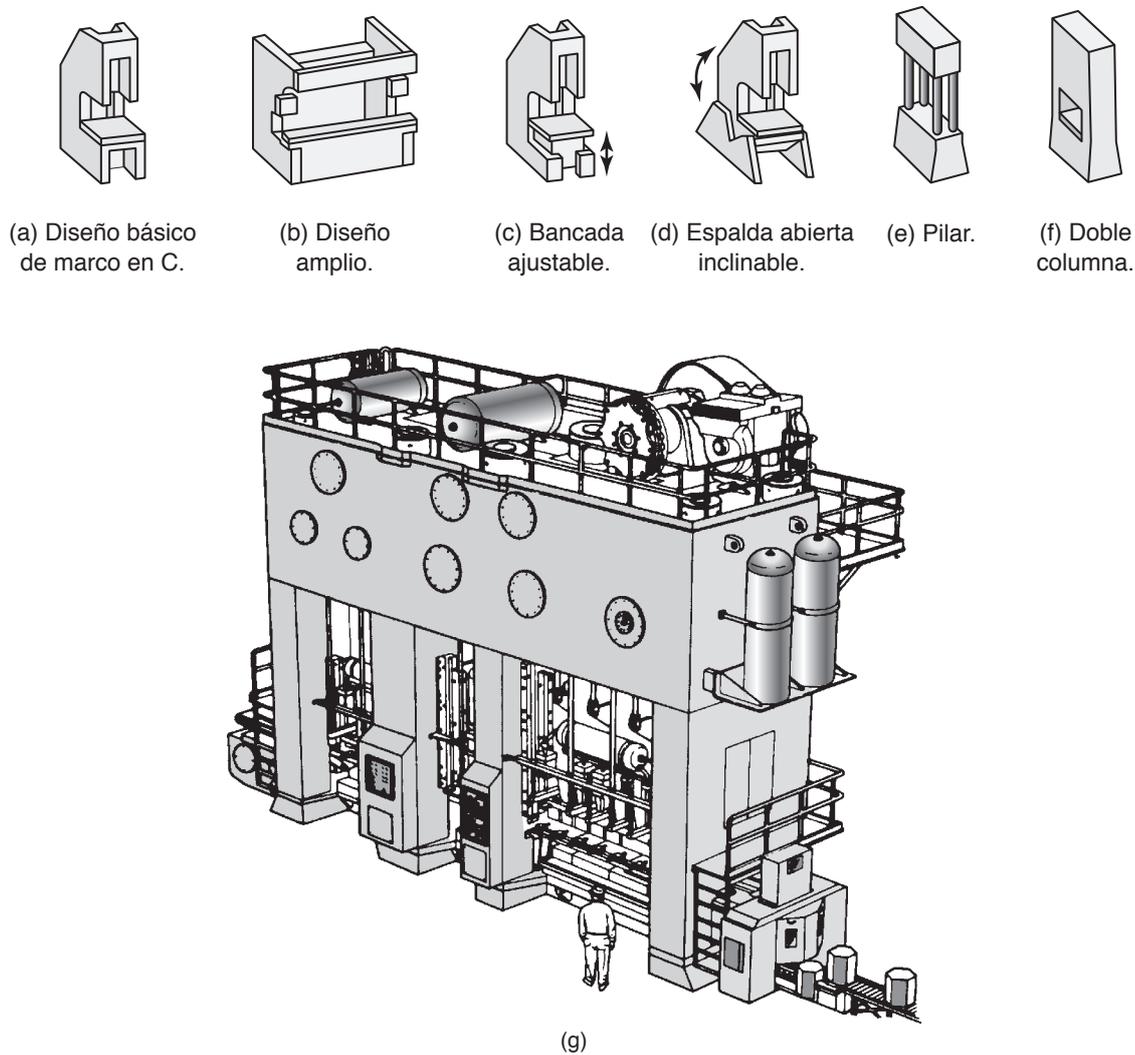


FIGURA 16.64 (a) a (f) Ilustraciones esquemáticas de los tipos de marcos de prensa utilizados para las operaciones de formado de láminas, cada tipo tiene sus propias características de rigidez, capacidad y accesibilidad. (g) Enorme prensa de estampado. Fuente: (g) Impreso con autorización de Enprotech Industrial Technologies, Inc.

correcto, la rigidez y la construcción adecuadas de estos equipos son esenciales para el funcionamiento eficiente del sistema y para lograr una alta tasa de producción, un buen control dimensional y alta calidad del producto.

La estructura tradicional del **marco en C** (figura 16.64a) ha sido ampliamente utilizada para facilitar el acceso de la herramienta y la pieza de trabajo, pero no es tan rígida como el **pilar tipo caja** (figura 16.64e) o la estructura del **marco de doble columna** (figura 16.64f). La accesibilidad a las zonas de trabajo en las prensas se ha vuelto menos importante debido a los avances en la automatización y al uso de robots industriales y controles por computadora.

La *selección de la prensa* para las operaciones de formado de láminas metálicas depende de varios factores:

1. Tipo de operación de formado, tamaño y forma de los troqueles y herramienta que se requiere.
2. Tamaño y forma de las piezas.
3. Longitud de la carrera de la corredera, número de carreras por minuto, velocidad de funcionamiento y altura de cierre (es la distancia medida desde la parte superior de la cama hasta la parte inferior de la corredera con la carrera abajo).
4. Número de correderas: las prensas de acción sencilla tienen una corredera de movimiento alternado; las prensas de doble acción tienen dos correderas —una de movimiento alternado y otra con movimiento en la misma dirección— y, por lo general, se utilizan para el embutido profundo, una corredera es para el punzón y la otra para el soporte de la pieza en bruto; las prensas de triple acción tienen tres correderas y, generalmente, se utilizan para el reembutido inverso y para otras operaciones complicadas de formado.
5. Fuerza máxima necesaria (capacidad de presión y evaluación del tonelaje).
6. Tipo y nivel de los controles mecánicos, hidráulicos y computacionales.
7. Características para el cambio de dados y troqueles. Debido a que el tiempo requerido para cambiar los dados en las prensas puede ser significativo (llegando incluso a ocupar algunas horas) y, por lo tanto, afectar la productividad, se han desarrollado sistemas de troqueles con cambios rápidos; en un sistema llamado *intercambio de dados en un solo minuto* (SMED, por sus siglas en inglés), las configuraciones de troquel pueden cambiarse en menos de 10 minutos mediante el uso de sistemas hidráulicos o neumáticos controlados por computadora.
8. Equipos de seguridad.

Debido a que una prensa representa una gran inversión de capital, se debe investigar su uso presente y futuro para una amplia variedad de piezas y aplicaciones. La versatilidad y los usos múltiples son factores importantes en la selección de una prensa, en particular para las modificaciones de los productos y para la manufactura de nuevos productos que respondan a los continuamente cambiantes mercados.

16.16 Economía de las operaciones para el formado de láminas metálicas

El formado de láminas metálicas implica consideraciones económicas semejantes a las de los otros procesos metalúrgicos. Las operaciones de formado de láminas metálicas son muy versátiles y puede considerarse cierto número de procesos para producir la misma pieza. Los costos involucrados (vea también el capítulo 40) dependen de las operaciones especiales, como los costos de los dados y troqueles, del equipo y de la mano de obra. Para piezas pequeñas y sencillas, los costos de los dados y troqueles y los tiempos de entrega para manufacturarlos son relativamente bajos. Por otra parte, para las operaciones a gran escala, como el formado de paneles para avión y cascos para barcos, estos costos son muy altos. Además, debido a que el número de piezas necesarias es bajo, el costo por pieza puede ser muy alto (vea la figura 14.21).

El embutido profundo requiere matrices y herramientas caras, pero es posible producir un número muy elevado de piezas, como recipientes, latas y productos domésticos simila-

res, con la misma configuración. Los costos para otros procesos, como el punzonado, troquelado, doblado y rechazado, varían considerablemente.

Los costos de los equipos varían mucho, dependiendo en gran medida de la complejidad de la operación de formado, de las características de carga y descarga de la pieza, del tamaño y de la forma de la pieza y del nivel de automatización y control del equipo necesario. La automatización, a su vez, afecta directamente a la mano de obra y al nivel de habilidad requerido. Tenga en cuenta que cuanto mayor sea el grado de automatización, menor será el nivel de habilidad requerido. Además, muchas piezas de lámina metálica suelen requerir algunas operaciones de acabado, una de las más comunes es el desbarbado de los bordes de la pieza fabricada, que por lo general es una labor intensiva. Sin embargo, se han hecho avances significativos en el desbarbado automático, el cual a su vez requiere un equipo controlado por computadora y por ello puede resultar costoso.

Como un ejemplo de la versatilidad de las operaciones de formado de láminas metálicas y de los costos involucrados, recuerde que una pieza en forma de copa puede formarse por embutido profundo, rechazado, formado de hule o formado explosivo. La pieza también puede formarse mediante extrusión por impacto, fundición o fabricarse mediante el ensamble o la soldadura de diferentes piezas. Cada uno de estos métodos involucra diferentes costos. Por ejemplo, la pieza mostrada en la figura 16.65 puede hacerse por embutido profundo o rechazado convencional, pero los costos del troquel para los dos procesos son muy diferentes.

Los datos de embutido profundo tienen componentes diversos y cuestan mucho más que los mandriles y las herramientas relativamente simples que se emplean en un proceso como el rechazado. Por lo tanto, en el embutido, el costo de los dados por cada pieza será alto, especialmente si sólo se requieren unas pocas piezas. La pieza también puede formarse por embutido profundo y en un tiempo mucho más corto que con el rechazado, incluso si la última operación se automatiza y controla por computadora. Además, el rechazado suele requerir más mano de obra calificada. Considerando estos factores, el punto de equilibrio para la pieza de la figura 16.65 es de alrededor de 700 piezas, para cantidades mayores, el embutido profundo resulta más económico.

RESUMEN

- Los procesos de formado de láminas metálicas se encuentran entre los más versátiles de todas las operaciones metalúrgicas. Por lo general, se utilizan en piezas de trabajo que tienen altas proporciones de área superficial sobre espesor. A diferencia de los procesos de formado a granel, como el forjado y la extrusión, las operaciones de formado de láminas metálicas a menudo impiden que el espesor de la lámina se reduzca.
- Los parámetros importantes de los materiales son la calidad del borde de la pieza cortada, la capacidad de la lámina para estirarse uniformemente, la resistencia del material al adelgazamiento, la anisotropía normal y planar, el tamaño de grano y, para los aceros al bajo carbono, la elongación hasta el punto de fluencia.
- Las fuerzas y la energía necesarias en los procesos de formado se transmiten a la lámina a través de herramientas y dados fuertes, por medio de miembros de hule flexible o poliuretano, o por medios eléctricos, químicos, magnéticos y gaseosos.
- Debido a que los materiales utilizados son relativamente delgados, la restitución, el pandeo y los pliegues son factores significativos en el formado de láminas. Estas dificultades pueden eliminarse o reducirse mediante el diseño de herramientas y dados, minimizando la longitud no soportada de la lámina durante el procesamiento, y controlando el espesor y el acabado superficial de la lámina entrante, así como sus propiedades mecánicas.
- El formado superplástico de láminas unidas por difusión es un proceso importante para la fabricación de estructuras complejas de lámina metálica, en particular para aplicaciones aeroespaciales donde las altas relaciones de rigidez a peso son importantes.

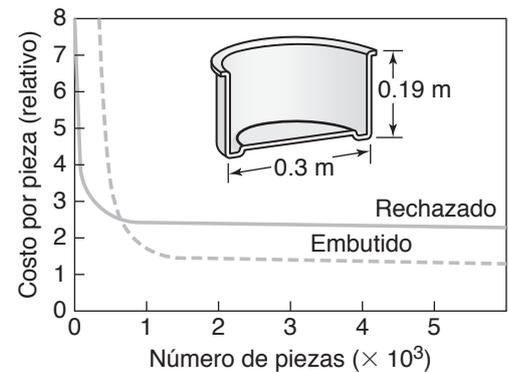


FIGURA 16.65 Comparativo de costos para la manufactura de un contenedor redondo de lámina metálica, ya sea por rechazado convencional o por embutido profundo; observe que para cantidades pequeñas, el rechazado es más económico.

- Se han desarrollado diversos métodos de prueba para predecir la formabilidad de los metales laminados.
- Para las operaciones generales de estampado, los diagramas de límite del formado son muy útiles porque establecen relaciones cuantitativas entre las principales deformaciones mayores y menores que limitan el formado seguro.

TÉRMINOS CLAVE

Abombamiento	Embutido	Frenos de embutido (rebordes)	Rebordeado
Anidación	Embutido profundo	Hilvanado	Rechazado
Anisotropía normal	Estampado en caliente	Holgura	Reembutido
Anisotropía planar	Estructuras de panal	Holgura de doblado	Reglas de acero
Anisotropía plástica	Formabilidad	Horadado	Relación de embutido límite
Arrugamiento (pliegues)	Formado asistido por láser	Microformado	Repujado
Bandas de Lüder	Formado con rodillos	Niblado	Resistencia a la abolladura
Bordes ondulados	Formado de hule	Pisador de pieza	Restitución
Bridado	Formado electrohidráulico	Planchado	Superficie pulida
Capacidad al doblez ("doblabilidad")	Formado explosivo	Prensa excéntrica	Troquelado
Cizallamiento	Formado incremental	Proceso de hidroformado	Troquelado fino
Cortado longitudinal	Formado por extensión	Punzonado	Troqueles compuestos
Desbarbado	Formado por impulso magnético	Radio mínimo de doblez	Troqueles de transferencia
Diagrama de límite de formado	Formado superplástico	Rasurado	Troqueles progresivos
Doblado	Formatos soldados a la medida	Realzado	
		Rebaba	

BIBLIOGRAFÍA

- Altan, T. y Tekkaya, T. (eds.), *Sheet Metal Forming: Fundamentals*, ASM International, 2012.
- Altan, T., Tekkaya, T. (eds.), *Sheet Metal Forming: Processes and Applications*, ASM International, 2012.
- ASM *Handbook*, Vol. 14B: *Metalworking: Sheet Forming*, ASM International, 2006.
- Boljanovic, V., *Sheet Metal Forming Process and Die Design*, Industrial Press, 2004.
- Davies, G., *Materials for Automobile Bodies*, Butterworth-Heinemann, 2003.
- Hosford, W. F. y Caddell, R. M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 4a. ed., Cambridge, 2011.
- Hu, J., Marciniak, Z. y Duncan, J., *Mechanics of Sheet Metal Forming*, 2a. ed., Butterworth-Heinemann, 2002.
- Pearce, R., *Sheet Metal Forming*, Springer, 2006.
- Rapien, B. L., *Fundamentals of Press Brake Tooling*, Hanser Gardner, 2005.
- Spitler, D., Lantrip, J., Nee, J. y Smith, D. A., *Fundamentals of Tool Design*, 5a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 2005.
- Suchy, I., *Handbook of Die Design*, 2a. ed., McGraw-Hill, 2005.
- Szumera, J. A., *The Metal Stamping Process*, Industrial Press, 2003.
- Tschaetch, H., *Metal Forming Practise: Processes, Machines, Tools*, Springer, 2007.

PREGUNTAS DE REPASO

- 16.1** ¿En qué difiere el formado de láminas metálicas del laminado, del forjado y de la extrusión?
- 16.2** ¿Qué causa las rebabas? ¿Cómo pueden reducirse o eliminarse?
- 16.3** Explique la diferencia entre el punzonado y el troquelado.
- 16.4** Describa la diferencia entre los troqueles compuestos, progresivos y de transferencia.
- 16.5** Describa las características de la lámina metálica que son importantes en las operaciones de formado de láminas metálicas. Explique por qué son importantes.

- 16.6** Describa las características de los diagramas de límite de formado (FLD).
- 16.7** Liste las propiedades de los materiales que influyen en la restitución. Explique por qué y cómo lo hacen.
- 16.8** Defina una aplicación específica para cada una de las operaciones de doblado comunes que se describen en este capítulo.
- 16.9** ¿Por qué los tubos se pandean al doblarlos? ¿Cuál es el efecto de la relación del grosor al diámetro del tubo?
- 16.10** Defina la anisotropía normal y explique por qué es importante para determinar la capacidad de embutido de un material.
- 16.11** Describa los bordes ondulados y por qué ocurren.
- 16.12** ¿Cuáles son las ventajas del formado de hule? ¿Qué procesos le competen?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 16.21** Explique las diferencias que usted ha observado entre los productos fabricados con lámina metálica y los obtenidos mediante fundición y forjado.
- 16.22** Tome cualquiera de los tres temas del capítulo 2 y, con ejemplos específicos para cada uno, muestre su relevancia para los temas que se tratan en este capítulo.
- 16.23** Haga lo mismo que en el problema 16.22, pero para el capítulo 3.
- 16.24** Identifique las variables del proceso y de los materiales que influyen en la fuerza del punzón durante el cizallamiento y explique cómo afecta cada una de tales variables a esta fuerza.
- 16.25** Explique por qué la restitución depende del esfuerzo de cedencia, del módulo de elasticidad, del grosor de la lámina y del radio de doblez.
- 16.26** Explique por qué las pruebas de acopamiento no pueden predecir la formabilidad de las láminas metálicas en los procesos reales de formado.
- 16.27** Identifique los factores que influyen en la fuerza de embutido profundo, F , de la figura 16.32b y explique por qué lo hacen.
- 16.28** ¿Por qué los frenos de embutido de la figura 16.36b se colocan en esos sitios en particular?
- 16.29** Una regla general para las relaciones dimensionales del embutido exitoso sin un pisador está dada por la ecuación (16.14). Explique lo que sucedería si se supera este límite.
- 16.30** En la sección 16.2 se afirmó que la fuerza de separación del punzón es difícil de calcular debido a los muchos factores que intervienen. Haga una lista de estos factores e incluya una breve explicación acerca de por qué afectarían a la fuerza de separación.
- 16.31** ¿Es posible que haya planchado en una operación ordinaria de embutido profundo? ¿Cuál es el factor más importante?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

- 16.41** Calcule el R_{prom} para un metal en el que los valores de R para las direcciones a 0, 45 y 90° son 0.9, 1.7 y 1.8, respectivamente. ¿Cuál es la relación de embutido límite (LDR) para este material?
- 16.42** Calcule el valor de ΔR en el problema 16.41. ¿Se forman bordes ondulados cuando este material se embute profundamente? Explique su respuesta.

- 16.13** Explique la diferencia entre el embutido profundo y el reembutido.
- 16.14** ¿En qué se distingue fundamentalmente el formado con rodillos del laminado?
- 16.15** ¿Qué es anidación? ¿Cuál es su importancia?
- 16.16** Describa las diferencias entre los troqueles compuestos, progresivos y de transferencia.
- 16.17** ¿Qué es el microformado?
- 16.18** Explique las ventajas del formado superplástico.
- 16.19** ¿Qué es el estampado en caliente? ¿Para qué materiales se utiliza?
- 16.20** ¿Qué es la restitución? ¿Qué es la restitución negativa?

- 16.32** Observe la rugosidad de la periferia del orificio bridado de la figura 16.25c y comente sobre sus posibles efectos cuando la pieza se utilice en un producto.
- 16.33** ¿Qué recomendaciones haría usted para eliminar el agrietamiento de la pieza doblada que se muestra en la figura 16.17c? Explique sus razonamientos.
- 16.34** Se ha dicho que la calidad de los bordes cortados puede influir en la formabilidad de los metales laminados. Explique por qué.
- 16.35** Proporcione varios ejemplos específicos de este capítulo en los que la fricción sea deseable y varios en los que no lo sea.
- 16.36** Como puede verse, algunas de las operaciones descritas en este capítulo producen desechos y mermas considerables. Describa sus razonamientos con respecto a la reutilización, al reciclado o eliminación de estos desechos. Considere su tamaño, su forma y la contaminación por fluidos de corte generada durante el procesamiento.
- 16.37** A través de cambios en el diseño de la sujeción o de los dados, es posible que una lámina metálica se someta a una deformación menor negativa. Explique cómo puede resultar ventajoso este efecto.
- 16.38** ¿Cómo produciría usted la pieza mostrada en la figura 16.43b mediante un proceso distinto al hidroformado de tubos?
- 16.39** Se ha dicho que cuanto más gruesa sea la lámina metálica, mayor será la curva en el diagrama de límite de formado. Explique por qué.
- 16.40** Si la prueba de acopamiento (vea la figura 16.13) se realizara utilizando un lubricante a presión en vez de un punzón esférico, ¿se esperaría que el diagrama de límite de formado cambiara? ¿Por qué sí o por qué no?

- 16.43** Estime la relación de embutido límite para los materiales que se listan en la tabla 16.4.
- 16.44** Use la ecuación (16.15) y el valor de K para el TNT, grafique la presión en función del peso, W , y de R , respectivamente. Describa sus observaciones.

16.45 La sección 16.5 establece que los valores de k en la holgura del doblé dependen de las magnitudes relativas de R y T . Explique por qué existe esta relación.

16.46 Para el formado explosivo, calcule la presión máxima en el agua por 0.25 lb de TNT a una distancia media de 4 pies. Comente si la magnitud de esta presión es lo suficientemente alta o no para el formado de láminas metálicas.

16.47 Mida las respectivas áreas de los contornos continuos en la figura 16.14a y compárelas con las áreas de los círculos originales. Calcule los grosores finales de las láminas, suponiendo que la lámina original tiene 1 mm de grosor.

16.48 Grafique la ecuación (16.6) en términos del módulo de elasticidad, E , y el esfuerzo de cedencia, Y , del material, y describa sus observaciones.

16.49 ¿Cuál es el radio de doblé mínimo para una lámina metálica de 1.0 mm de espesor con una reducción del área a la tensión de 30%? ¿El ángulo de doblé afecta su respuesta? Explique.

16.50 Revise la literatura técnica y explique el mecanismo por el cual puede ocurrir la restitución negativa en los troqueles de doblado en V. Muestre que la restitución negativa no se produce en el doblado al aire.

16.51 Con los datos de la tabla 16.3 y en referencia a la ecuación (16.5), calcule la reducción de área a la tensión para los materiales y las condiciones que se listan en la tabla.

16.52 ¿Cuál es la fuerza requerida para punzonar un orificio cuadrado de 50 mm por lado en una lámina de aluminio 5052-O de 0.1 mm de espesor usando punzones planos? ¿Cuál sería su respuesta si se utilizan punzones biselados?

16.53 En el caso de estudio 16.2 se dijo que la razón para reducir las tapas de las latas (por estricción) es ahorrar material en la fabricación de la tapa. ¿Cuánto material se ahorrará si el diámetro de la tapa se reduce en 5%? ¿En 20 por ciento?

16.54 Una copa se está embutiendo a partir de una lámina metálica que tiene una anisotropía normal de 3. Estime la relación máxima de altura a diámetro de la copa que se puede embutir con éxito en un solo embutido. Suponga que el espesor de la lámina a lo largo de la copa sigue siendo el mismo que el espesor original de la pieza en bruto.

16.55 Estime el porcentaje de chatarra generada en la producción de discos metálicos si la holgura entre las piezas es una

décima parte de su radio. Considere una sola fila y varias filas de troquelado, como se bosqueja en la figura P16.55.

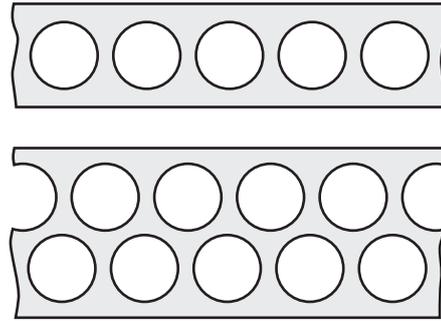


FIGURA P16.55

16.56 Grafique el radio de doblé final como una función del radio de doblé inicial en el doblado de (a) aluminio 5052-O; (b) aluminio 5052-H34; (c) latón C24000 y (d) acero inoxidable AISI 304.

16.57 La figura P16.57 muestra un perfil parabólico que definirá la forma del mandril en una operación de rechazado. Determine la ecuación de la superficie parabólica. Si una pieza rechazada se produce a partir de un disco con espesor de 10 mm, determine el diámetro mínimo requerido para ese disco.

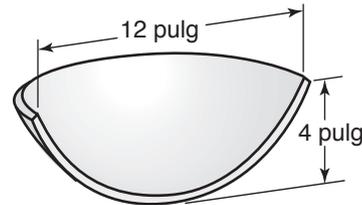


FIGURA P16.57

16.58 Suponga que usted es un profesor que cubre los temas descritos en este capítulo y aplicará un examen de los aspectos numéricos para probar la comprensión de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione sus respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

16.59 Examine algunos de los productos que haya en su casa o automóvil y estén hechos de lámina metálica, luego analice el proceso o la combinación de procesos mediante los que usted piensa que se hicieron.

16.60 Considere varias formas que se cortarán a partir de una lámina grande (por ejemplo ovalada, triangular, en L, etc.) mediante corte por rayo láser, luego bosqueje un diseño de anidación para reducir al mínimo la generación de chatarra.

16.61 Proporcione varias aplicaciones en productos específicos del (a) hilvanado y (b) el cosido.

16.62 Muchos cuerpos de misiles axisimétricos se hacen por rechazado. ¿Qué otros métodos podría usted utilizar si los procesos de rechazado no estuvieran disponibles?

16.63 Proporcione varios diseños estructurales y aplicaciones en los que la unión por difusión y el formado superplástico puedan utilizarse en conjunto. Opine sobre si esta combinación es capaz de producir piezas a gran volumen.

16.64 Las latas metálicas son de dos piezas (donde la parte inferior y los lados están integrados) o de tres piezas (donde los lados, la parte inferior y la parte superior son piezas separadas).

Para una lata de tres piezas, ¿la costura vertical en el cuerpo podría ser (a) en la dirección de laminado, (b) normal a la dirección de laminado u (c) oblicua a la dirección de laminado? Compruebe su respuesta.

16.65 El diseño mostrado en la figura P16.65 se propone para una bandeja de metal cuyo cuerpo principal es de lámina de acero laminado en frío. Considerando sus características y que la lámina se dobla en dos direcciones diferentes, comente los diversos aspectos de la manufactura. Incluya factores como la anisotropía de la lámina laminada, la textura de su superficie, las direcciones de doblado, la naturaleza de los bordes cortados y la forma en que el asa encaja a presión en el ensamble.

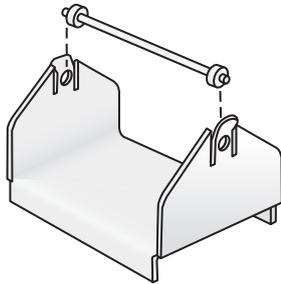


FIGURA P16.65

16.66 Sugiera diseños de productos de consumo que podrían utilizar las estructuras de panal. Por ejemplo, un ascensor puede utilizar un laminado de panal como un material rígido y ligero para el piso.

16.67 ¿Cómo produciría usted la pieza mostrada en la figura 16.44 con un proceso distinto al hidroformado de tubos? Aporte dos opciones.

16.68 Usando un martillo de bola, golpee la superficie de láminas de aluminio con diferentes espesores hasta que desarrollen una curvatura. Describa sus observaciones sobre las formas producidas.

16.69 Inspeccione una perforadora de papel común y observe la forma de la punta del punzón. Compárela con las formas que se muestran en la figura 16.10 y comente sus observaciones.

16.70 Tome una lata de aluminio para bebidas y córtela por la mitad en forma longitudinal utilizando unas tijeras de hojalatero. Use un micrómetro y mida el espesor de la parte inferior de la lata y de su pared. Estime las reducciones de espesor ocurridas en el planchado y el diámetro de la pieza en bruto.

16.71 Con el fin de mejorar su ductilidad, un rollo de lámina metálica se coloca en un horno y se recuece. Sin embargo, se observa que la lámina tiene una relación de embutido límite menor de la que tenía antes de ser recocida. Explique las razones de este comportamiento.

16.72 Con las piezas automotrices, a menudo resulta ventajoso tener una pieza con propiedades a la medida. Por ejemplo, un pilar que proporcione soporte estructural para una cabina de conductor puede ser resistente, pero menos dúctil en el centro y más dúctil y menos fuerte en los sitios donde se une al resto de la estructura del vehículo. Liste algunas formas para producir tales propiedades a la medida en los estampados en caliente.

16.73 Proporcione tres ejemplos de piezas de lámina metálica que (a) puedan y (b) no puedan producirse por formado incremental.

16.74 Realice una búsqueda bibliográfica y obtenga la ecuación de una curva tractriz, como se usa en la figura 16.38.

16.75 Con base en experimentos, se ha sugerido que el concreto, ya sea simple o reforzado, puede ser un material adecuado para los dados de las operaciones de formado de láminas metálicas. Describa sus razonamientos con respecto a esta propuesta, considerando la geometría del dado y cualesquiera otros factores que puedan ser pertinentes.

16.76 Investigue métodos para determinar las formas óptimas de las piezas en bruto (formatos) para efectuar las operaciones de embutido profundo. Bosquee las piezas en bruto formadas óptimamente para la elaboración de copas rectangulares y optimice su diseño para una lámina metálica grande.

16.77 Diseñe una caja que contendrá un volumen de 4 pulg \times 6 pulg \times 3 pulg. La caja debe producirse a partir de dos piezas de lámina metálica y no debe requerir herramientas o elementos de fijación para su ensamble.

16.78 Repita el problema 16.77, pero diseñe la caja con una sola pieza de lámina metálica.

17.1	Introducción	444
17.2	Producción de polvos metálicos	445
17.3	Compactación de polvos metálicos	450
17.4	Sinterizado	461
17.5	Operaciones secundarias y de acabado	464
17.6	Consideraciones de diseño	466
17.7	Economía de la metalurgia de polvos	469

CASOS DE ESTUDIO:

17.1	Prensado isostático en caliente de un elevador de válvula	456
17.2	Componentes del teléfono móvil fabricados mediante moldeo por inyección de metal	458
17.3	Piezas elaboradas por metalurgia de polvos en un quitanieves	470

- En este capítulo se describe el proceso de la metalurgia de polvos empleado para producir piezas de forma neta a partir de polvos metálicos.
- El capítulo inicia con un estudio de los métodos de producción y mezcla de polvos metálicos; después, se presenta una investigación de las formas que desarrollan los polvos de acuerdo con el proceso empleado en su fabricación.
- A continuación, se presentan algunas operaciones secundarias tales como la compactación para consolidar el polvo en una forma deseada y el sinterizado para fundir las partículas y lograr la resistencia requerida.
- Enseguida, se analizan los procesos particulares adicionales a la metalurgia de polvos y se presentan las reglas de diseño.
- El capítulo concluye con un análisis de las capacidades y la economía del proceso en comparación con otras operaciones de manufactura competidoras.

Productos típicos fabricados: bielas, anillos de pistón, engranes, levas, bujes, cojinetes, herramientas de corte, implantes quirúrgicos, imanes y filtros metálicos.

Procesos alternativos: fundición, forjado y maquinado.

17.1 Introducción

En los procesos de manufactura descritos hasta ahora, las materias primas utilizadas han sido metales y aleaciones, ya sea en estado fundido (fundición) o en forma sólida (metalurgia). Este capítulo describe la **metalurgia de polvos** o pulvimetalurgia (PM, por sus siglas en inglés), donde polvos metálicos se compactan en las a menudo complejas formas deseadas y se sinterizan (calientan sin llegar a fundirse) para formar una pieza sólida. Este proceso se utilizó por primera vez en Egipto alrededor del año 3000 a. C., para fabricar herramientas de hierro. Uno de sus primeros usos modernos se dio a inicios del siglo XX para hacer los filamentos de tungsteno de las bombillas incandescentes. La disponibilidad de una amplia gama de composiciones de polvos metálicos, la capacidad de producir piezas con dimensiones netas (**formado de forma neta**) y los aspectos económicos generalmente favorables de la operación dan a este proceso sus numerosas aplicaciones atractivas y en expansión.

Existe un amplio rango de piezas y componentes fabricados mediante las técnicas de metalurgia de polvos (figura 17.1): balines para bolígrafos; componentes automotrices, que ahora constituyen alrededor del 70% del mercado de la PM, como anillos de pistón, bielas, balatas, engranes, levas y bujes; aceros para herramientas, carburos de tungsteno y cermets como materiales para herramientas y dados, escobillas de grafito impregnadas con cobre para motores eléctricos; materiales magnéticos; filtros de metal y cojinetes impregnados de aceite con porosidad controlada; espumas metálicas e implantes quirúrgicos. Los avances actuales en la PM permiten fabricar piezas *estructurales* de aeronaves,



Código QR 17.1 Introducción a la metalurgia de polvos. (Fuente: Cortesía de la Metal Powder Industries Federation).

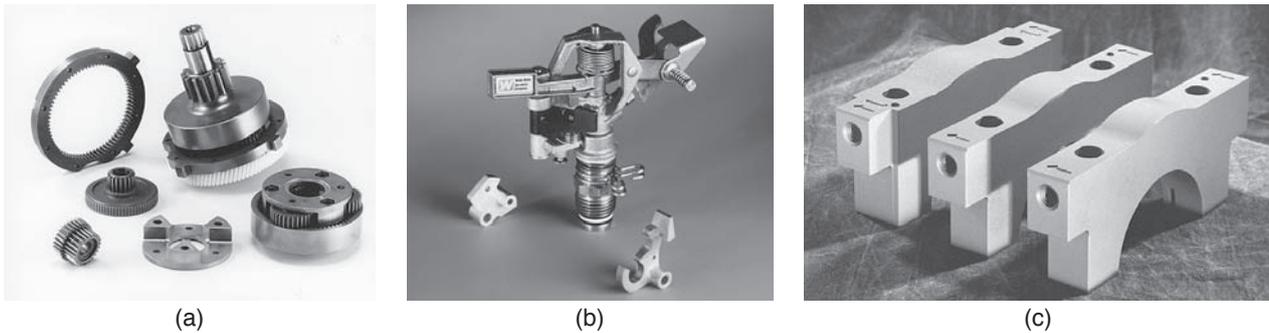


FIGURA 17.1 (a) Ejemplos de piezas típicas hechas mediante procesos de metalurgia de polvos. (b) Palanca de descarga superior de un aspersor de riego comercial elaborada por PM, esta pieza se hace a partir de una aleación de latón sin plomo; sustituye a una pieza fundida con 60% de ahorro en los costos. (c) Tapas de polvo metálico del cojinete principal para los motores automotrices de 3.8 y 3.1 litros de General Motors. *Fuente:* (a) y (b) Reproducido con autorización de *Success Stories on PM Parts*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, 1998. (c) Cortesía de Zenith Sintered Products, Inc., Milwaukee, Wisconsin.

como los componentes del tren de aterrizaje, soportes de montaje para motor, discos de motor, propulsores y marcos de góndola para el motor.

La metalurgia de polvos se ha vuelto competitiva con procesos tales como la fundición, el forjado y el maquinado, en particular para piezas relativamente complejas hechas a partir de aleaciones de alta dureza y alta resistencia. Aunque la mayoría de las piezas pesan menos de 2.5 kg (5 lb), pueden llegar a pesar hasta 50 kg (100 lb). Se ha demostrado que las piezas de PM pueden producirse en masa de manera económica en cantidades tan pequeñas como 5000 al año y tan grandes como 100 millones anuales para los vibradores de teléfono celular.

Los metales más utilizados en la PM son hierro, cobre, aluminio, estaño, níquel, titanio y los metales refractarios. Para las piezas de latón, bronce, aceros y aceros inoxidable se utilizan *polvos prealeados*, donde cada partícula de polvo es en sí misma una aleación. Las fuentes de los metales son generalmente metales a granel y aleaciones, minerales, sales y otros compuestos.

17.2 Producción de polvos metálicos

El proceso de metalurgia de polvos se compone básicamente de las siguientes operaciones, en secuencia (figura 17.2):

1. *Producción del polvo.*
2. *Mezclado.*
3. *Compactación.*
4. *Sinterizado.*
5. *Operaciones de acabado.*

17.2.1 Métodos de producción de polvos

Existen varios métodos para la producción de polvos metálicos y la mayoría de los polvos pueden producirse por más de un método; la elección depende de los requisitos del producto final. Las propiedades de microestructura, volumen y superficie, la pureza química, porosidad, forma y distribución del tamaño de las partículas dependen del proceso particular utilizado (figuras 17.3 y 17.4). Estas características son importantes porque afectan significativamente el flujo y la permeabilidad durante la compactación y

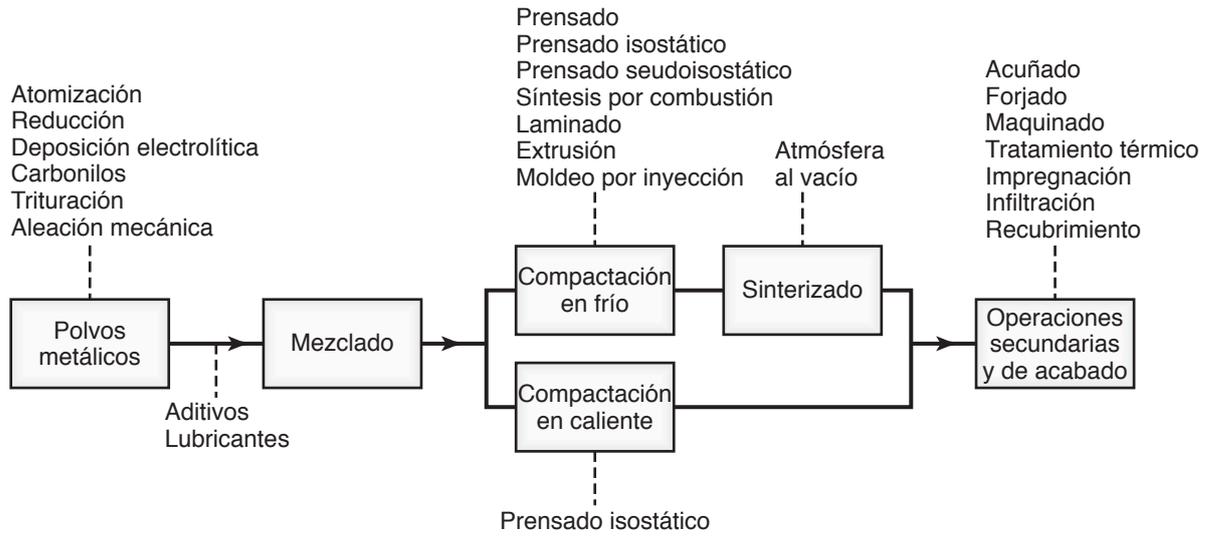


FIGURA 17.2 Esquema de los procesos y operaciones que intervienen en la producción de piezas por metalurgia de polvos.

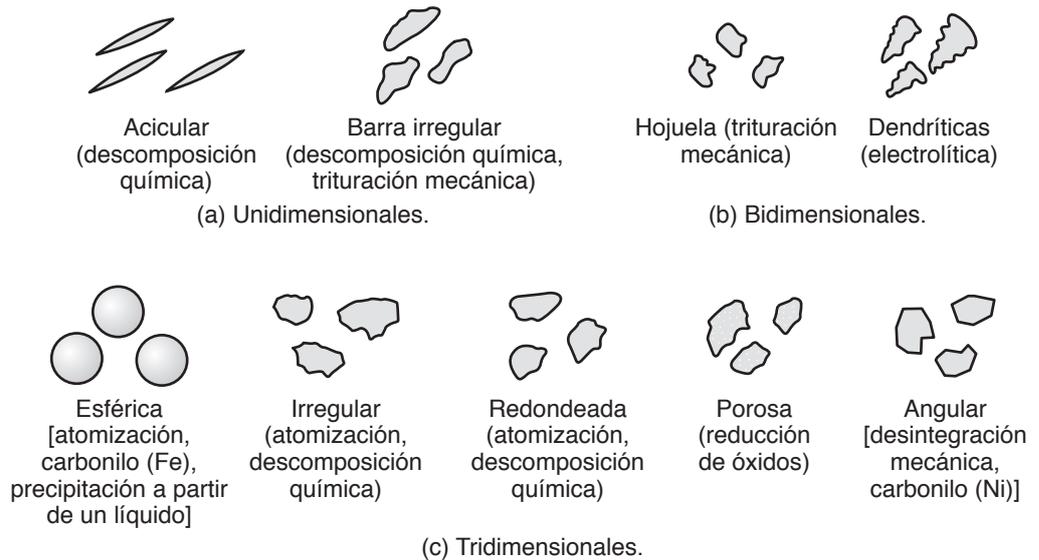


FIGURA 17.3 Formas de partícula en los polvos metálicos y procesos mediante los cuales se producen; los polvos de hierro se producen mediante muchos de estos procesos (vea también la figura 17.4).

las operaciones de sinterizado posteriores. Los tamaños de las partículas producidas van de 0.1 a 1000 μm (4 μpulg a 0.04 pulg).

Atomización. La atomización implica una corriente de metal líquido producida mediante la inyección de metal fundido a través de un pequeño orificio. La corriente se desarticula mediante chorros de gas inerte o aire (figura 17.5a) o de agua (figura 17.5b), lo cual se conoce como *atomización por gas* o *agua*, respectivamente. El tamaño y la forma de las partículas formadas dependen de la temperatura del metal fundido, de la velocidad del flujo, del tamaño de la boquilla y de las características del chorro. El uso de agua da como resultado una suspensión de polvo metálico y líquido en la parte

inferior de la cámara de atomización. Aunque los polvos deben secarse antes de que puedan ser utilizados, el agua permite un enfriamiento más rápido de las partículas y, por lo tanto, tasas de producción más altas. La atomización por gas suele resultar en partículas más esféricas (vea la figura 17.3c).

En la *atomización centrífuga*, el flujo de metal fundido cae en un disco o una copa que gira rápidamente; las fuerzas centrífugas separan la corriente y generan partículas (figura 17.5c). En una variación de este método, un electrodo consumible se hace girar rápidamente (a unas 15 000 rev/min) en una cámara llena de helio (figura 17.5d). La fuerza centrífuga rompe la punta del electrodo fundido en partículas metálicas.

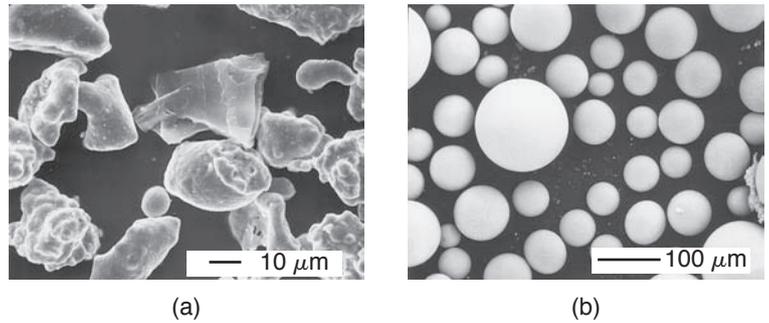


FIGURA 17.4 (a) Imagen por microscópica electrónica de barrido de partículas de hierro en polvo generadas por atomización. (b) Partículas de polvo de una superaleación base níquel (Udimet 700) hechas por el proceso de electrodo giratorio, vea la figura 17.5d. Fuente: Cortesía de P. G. Nash, Illinois Institute of Technology, Chicago.

Reducción. La *reducción* (eliminación de oxígeno) de óxidos metálicos utiliza gases, por ejemplo el hidrógeno y el monóxido de carbono, como agentes reductores. Por este medio, los óxidos metálicos muy finos se reducen al estado metálico. Los polvos producidos son esponjosos y porosos y tienen formas esféricas o angulares de tamaño uniforme.

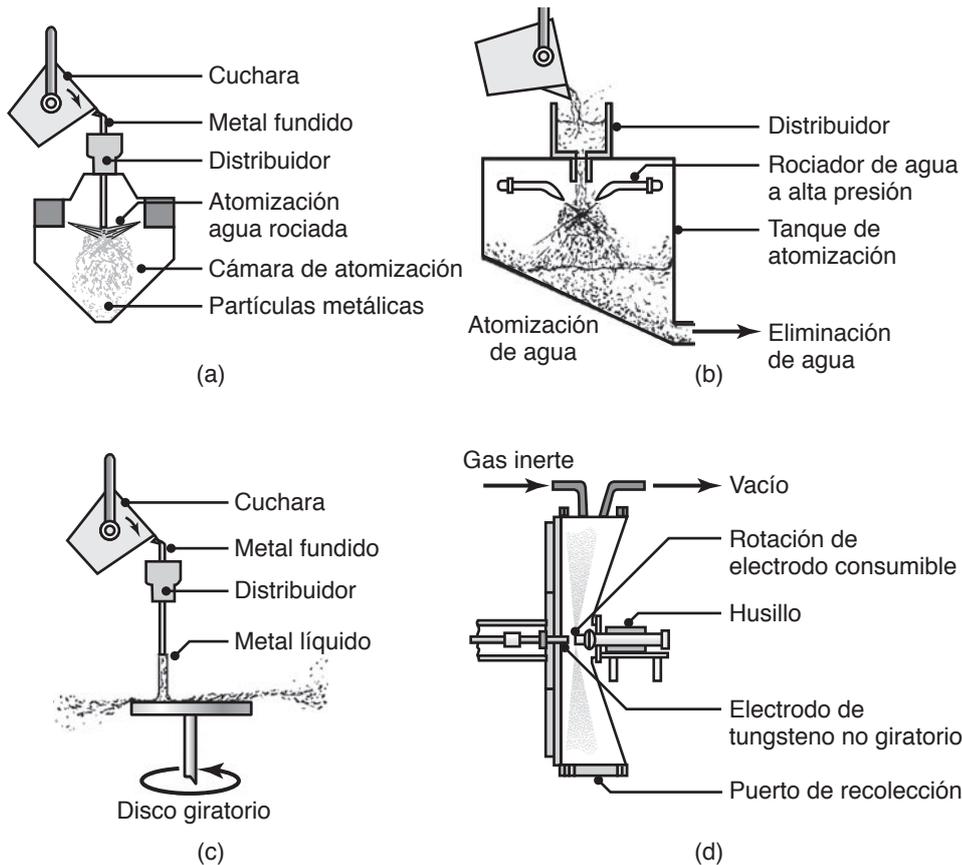


FIGURA 17.5 Métodos de producción de polvo metálico por atomización: (a) atomización por gas; (b) atomización por agua; (c) atomización centrífuga con un disco o una copa que giran, y (d) atomización con un electrodo consumible giratorio.

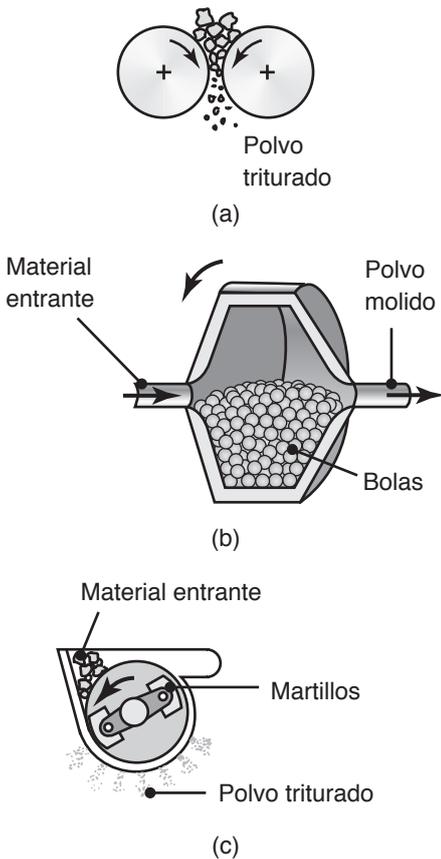


FIGURA 17.6 Métodos de trituración mecánica para obtener partículas finas: (a) trituración con rodillos; (b) molino de bolas y (c) molino de martillos.

Deposición electrolítica. La *deposición electrolítica* utiliza soluciones acuosas o bien sales fundidas. Los polvos producidos se encuentran entre los más puros disponibles.

Carbonilos. Los *carbonilos metálicos*, como el carbonilo de hierro $[Fe(CO)_5]$ y el carbonilo de níquel $[Ni(CO)_4]$, se forman al hacer reaccionar hierro o níquel con monóxido de carbono. Enseguida, los productos de la reacción se descomponen en hierro y níquel y se convierten en partículas pequeñas, densas, uniformemente esféricas de alta pureza.

Trituración. La *trituration mecánica (pulverización)* implica el aplastamiento (figura 17.6), la molienda en un molino de bolas o el molido de metales frágiles o menos dúctiles en pequeñas partículas. Un *molino de bolas* (figura 17.6b) es una máquina con un cilindro hueco giratorio parcialmente lleno con bolas de acero o de hierro fundido blanco. El polvo o las partículas colocadas en un molino de bolas son impactados por las bolas a medida que el cilindro gira o cuando su contenido se agita. Esta acción tiene dos efectos: (a) las partículas se fracturan periódicamente, lo que resulta en partículas más pequeñas y (b) la forma de las partículas se ve afectada. Con materiales frágiles, las partículas producidas tienen formas angulares; con metales dúctiles, las partículas toman forma de hojuela y no son particularmente adecuadas para aplicaciones en la metalurgia de polvos.

Aleación mecánica. En la *aleación mecánica*, los polvos de dos o más metales puros se mezclan en un molino de bolas, como se ilustra en la figura 17.7. Bajo el impacto de las duras bolas, los polvos se fracturan y enlazan entre sí por difusión, atrapando la segunda fase y formando polvos aleados. La fase dispersa puede resultar en el aumento de la resistencia de las partículas o puede transmitir propiedades eléctricas o magnéticas especiales al polvo.

Métodos diversos. Los métodos utilizados en menor proporción para la fabricación de polvos son:

- La precipitación a partir de una solución química.
- La producción de virutas metálicas finas por maquinado.
- La condensación de vapor.

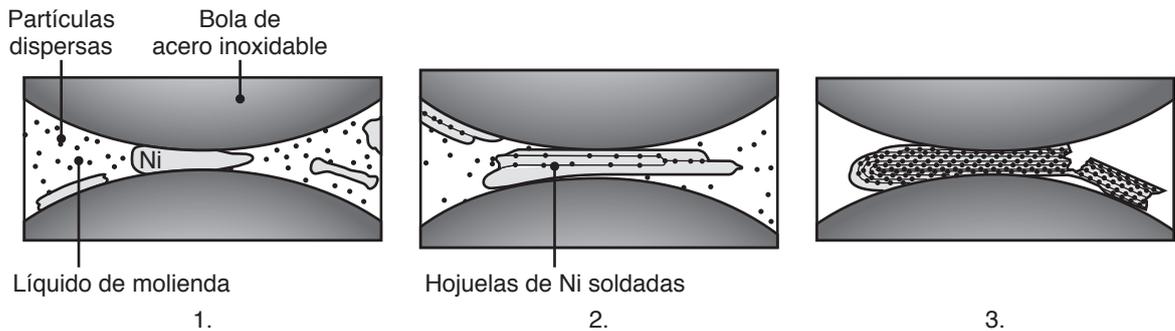


FIGURA 17.7 Secuencia de aleación mecánica de partículas de níquel con pequeñas partículas dispersas. Cuando las partículas de níquel se aplanan entre dos bolas, la segunda fase, más pequeña, se imprime en la superficie del níquel y, finalmente, se dispersa por toda la partícula debido al aplanamiento, la fractura y la soldadura sucesivos.

Los desarrollos incluyen técnicas basadas en *procesos metalúrgicos extractivos a altas temperaturas* que, a su vez, se basan en la reacción de haluros volátiles (un compuesto de halógeno y un elemento electropositivo) con metales líquidos, así como en la reducción controlada y la reducción/carburación de óxidos sólidos.

Nanopolvos. Los desarrollos más recientes incluyen la producción de *nanopolvos* de cobre, aluminio, hierro, titanio y otros metales (vea también *nanomateriales*, sección 8.8). Debido a que estos polvos son *pirofóricos* (se encienden espontáneamente), o se contaminan fácilmente cuando se exponen al aire, son transportados como suspensiones espesas bajo gas hexano (que a su vez es muy volátil y combustible). Cuando el material se somete a una gran deformación plástica por compresión y de cizallamiento, a los niveles de esfuerzo de 5500 MPa (800 ksi) encontrados durante el procesamiento de polvos, el tamaño de la partícula se reduce y el material queda libre de poros, por lo que posee propiedades mejoradas.

Polvos microencapsulados. Estos polvos metálicos están completamente revestidos con un aglutinante. Para aplicaciones eléctricas, como en los componentes magnéticos de las bobinas de encendido y otras aplicaciones de CA y CD por impulsos, el aglutinante actúa como un aislante para evitar que la electricidad fluya entre las partículas y, por consiguiente, reduce las pérdidas por corrientes Eddy. Los polvos se compactan por prensado en caliente y se utilizan con el aglutinante aún en su lugar (vea también *moldeo por inyección de polvos*, sección 17.3.3).

17.2.2 Tamaño, forma y distribución de partículas

El *tamaño de las partículas* se controla generalmente por *cribado*, es decir, haciendo pasar el polvo metálico a través de cribas (*tamices*) con diferentes tamaños de malla. Las cribas se apilan verticalmente, con tamaños de malla cada vez más finos a medida que el polvo fluye a través de las cribas. Cuanto mayor sea el tamaño de la malla, más pequeña es la abertura de la criba. Por ejemplo, un tamaño de malla de 30, tiene una abertura de 600 μm , un tamaño de 100 tiene 150 μm y el tamaño de 400 tiene 38 μm . (Este método es similar al número de granos abrasivos. Cuanto mayor sea el número, menor es el tamaño de la partícula abrasiva: vea la figura 26.7).

Existen muchos otros métodos disponibles para analizar el tamaño de las partículas:

1. La **sedimentación**, que implica medir la velocidad a la que las partículas se asientan en un fluido.
2. El **análisis microscópico**, que puede incluir el uso de la microscopía electrónica de transmisión y barrido.
3. La **dispersión de luz** a partir de un láser que ilumina una muestra de partículas suspendidas en un medio líquido; las partículas causan que la luz se disperse y, después, un detector digitaliza las señales y calcula la distribución de los tamaños de las partículas.
4. Los **métodos ópticos**, como el caso en que las partículas bloquean un haz de luz y entonces cada partícula es detectada por una fotocelda.
5. La **suspensión de partículas** en un líquido y la detección del tamaño y la distribución de las partículas mediante sensores eléctricos.

Forma de las partículas. Una influencia importante en las características de procesamiento es la forma de las partículas, la cual suele describirse en términos de su relación de aspecto o su factor de forma (SF, por sus siglas en inglés). La *relación de aspecto* es la relación de la dimensión más grande a la dimensión más pequeña de la partícula, y va desde la unidad, para una partícula esférica, hasta alrededor de 10 para las partículas de tipo hojuela o aguja.

Factor de forma. También conocido como *índice de forma*; el *factor de forma* es una medida de la relación del área superficial de la partícula a su volumen, normalizada con referencia a una partícula esférica de volumen equivalente. Por lo tanto, el SF de una hojuela es mayor que el de una esfera.

Distribución del tamaño. La distribución del tamaño de las partículas es una consideración importante ya que afecta las características de procesamiento del polvo. Esta distribución se da en términos de una *gráfica de distribución de frecuencias* (vea la sección 36.7 para más detalles). El máximo se denomina *tamaño modo*.

Otras propiedades de los polvos metálicos que tienen un efecto sobre cómo se comportan éstos durante el procesamiento son (a) las *propiedades de flujo* cuando los polvos se están introduciendo en los dados, (b) la *compresibilidad* cuando están siendo compactados, (c) la *densidad*, tal como se le ha definido en diversos términos como densidad teórica, densidad aparente y densidad, cuando el polvo se agita o golpea en la cavidad del dado.

17.2.3 Mezclado de polvos metálicos

El *mezclado* (o la combinación) de polvos es el siguiente paso en el procesamiento de la metalurgia de polvos y se lleva a cabo con los siguientes propósitos:

- Los polvos de diferentes metales y otros materiales pueden mezclarse con el fin de impartirle propiedades y características físicas y mecánicas especiales al producto de la metalurgia de polvos. Las mezclas de metales pueden producirse mediante la aleación del metal antes de crear un polvo y por combinaciones. El mezclado correcto resulta esencial para garantizar la uniformidad de las propiedades mecánicas en toda la pieza.
- Incluso cuando se utiliza un solo metal, los polvos pueden variar significativamente en tamaño y forma; por lo tanto, deben mezclarse para asegurar la uniformidad entre pieza y pieza. Una mezcla ideal es aquella en la que todas las partículas de cada material, y de cada tamaño y morfología, se distribuyen de manera uniforme.
- Es posible mezclar *lubricantes* con los polvos para mejorar sus características de flujo. Los lubricantes reducen la fricción entre las partículas de metal, optimizan el flujo de los metales en polvo hacia los dados y mejoran la vida del dado. Por lo general, los lubricantes utilizados son ácido esteárico o estearato de zinc en una proporción de entre 0.25 y 5% en peso.
- Otros aditivos, como los *aglutinantes* (por ejemplo en los moldes de arena, sección 11.2.1), se utilizan para transmitir la suficiente *resistencia en verde* o en crudo (vea la sección 17.3); los aditivos también pueden utilizarse para facilitar el sinterizado.

El mezclado de polvos debe llevarse a cabo en condiciones controladas para evitar su contaminación o deterioro. El deterioro se origina por un mezclado excesivo que puede alterar la forma de las partículas y causar endurecimiento por trabajo, haciendo más difícil la posterior compactación. Los polvos pueden mezclarse al aire, en atmósferas inertes (para evitar la oxidación) o en líquidos (que actúan como lubricantes y hacen más uniforme la mezcla). Existen varios tipos de equipo para mezclado (figura 17.8).

Riesgos. Debido a su alta relación de área superficial a volumen, los polvos metálicos pueden ser explosivos, especialmente los de aluminio, magnesio, titanio, zirconio y torio. Por lo tanto, se debe tener mucho cuidado con ellos durante su mezclado y en su almacenamiento y manipulación. Las precauciones incluyen (a) utilizar equipos de puesta a tierra, (b) evitar las chispas, mediante el uso de herramientas libres de éstas, (c) evitar la fricción como fuente de calor y (d) evitar las nubes de polvo y la exposición a fuentes de ignición, como flamas.

17.3 Compactación de polvos metálicos

Compactación es una etapa en la que los polvos mezclados se presionan en dados o matrices, como se muestra en la secuencia de la figura 17.9. Los efectos de la compactación son: (a) obtener la forma, la densidad y el contacto de partícula a partícula que

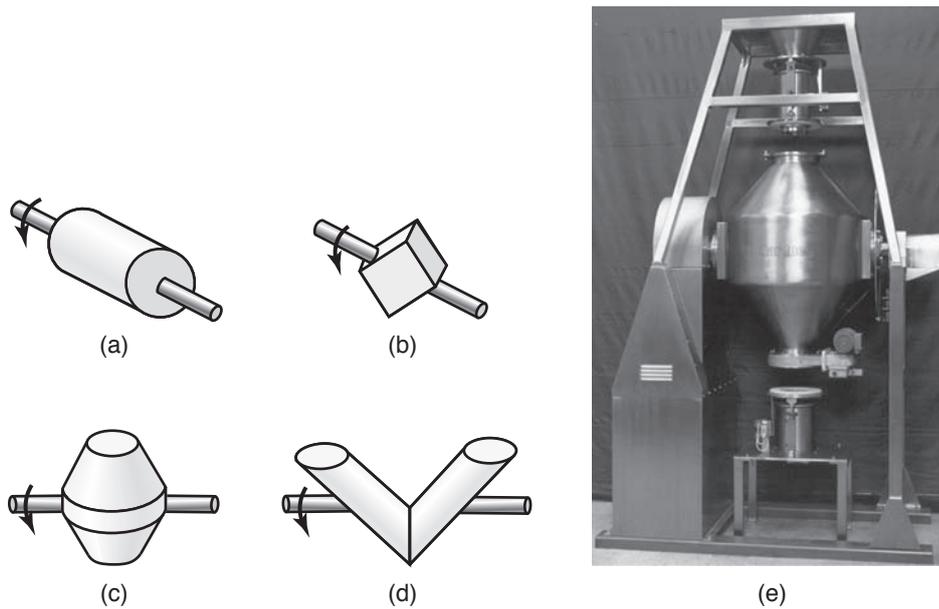


FIGURA 17.8 (a) a (d) Algunas geometrías comunes de los tambores utilizados para el mezclado o combinando de polvos. (e) Mezclador adecuado para la combinación de polvos metálicos. Puesto que los polvos metálicos son abrasivos, los mezcladores se basan en la rotación o el volteo de geometrías cerradas, en lugar de utilizar agitadores agresivos. *Fuente:* Cortesía de Kemutec Group, Inc.

se requieren y (b) hacer que la pieza sea lo suficientemente resistente para su posterior procesamiento. El polvo, denominado *materia prima*, se suministra a la matriz mediante una *zapata de alimentación* y el punzón superior desciende en la matriz. Las prensas utilizadas se accionan mecánicamente o hidráulicamente y el proceso tiene lugar, por lo general, a temperatura ambiente, aunque también puede realizarse a temperaturas elevadas para compactar metales con alto punto de fusión.

En la figura 17.10 se muestran las etapas de la compactación de polvos. En un inicio, el polvo está pobremente compactado y, por lo tanto, la porosidad resulta significativa. Con la aplicación de una presión baja, el polvo se reorganiza llenando los vacíos y produciendo un polvo más denso; sin embargo, los esfuerzos en los puntos de contacto entre los polvos todavía son bajos. La compactación continua causa un incremento del esfuerzo de contacto y de la deformación plástica del polvo, lo que resulta en un aumento de la adhesión de polvo.

El polvo presionado se conoce como **comprimido crudo** o **en verde** porque tiene baja resistencia, como se ve en las piezas en verde en el moldeo o vaciado de barbotina (sección 18.2.1). Estas piezas son muy frágiles y pueden desmoronarse o dañarse fácilmente; situación que se ve agravada por las prácticas inadecuadas de presión, como el manejo inapropiado o insuficiente de la compactación. Para mayores resistencias en verde, el polvo debe alimentarse correctamente en la cavidad de la matriz y hay que desarrollar la presión suficiente en toda la pieza.

La *densidad* del comprimido depende de la presión de compactación (figura 17.11a). A medida que aumenta la presión, la densidad compacta se aproxima a la del metal a granel. Un factor importante en la densidad es la *distribución* del tamaño de las partículas. Si todas las partículas son del mismo tamaño, siempre habrá alguna porosidad al compactarlas entre sí. Teóricamente, la porosidad es de al menos 24% en volumen. (Observe, por ejemplo, una caja llena de arroz, donde hay siempre espacios abiertos entre los granos individuales). Al introducir partículas más pequeñas en la mezcla en polvo, los espacios entre las partículas de polvo más grandes se llenarán y, por lo tanto, habrá mayor densidad del comprimido (vea también *aluminio poroso*, sección 6.2).

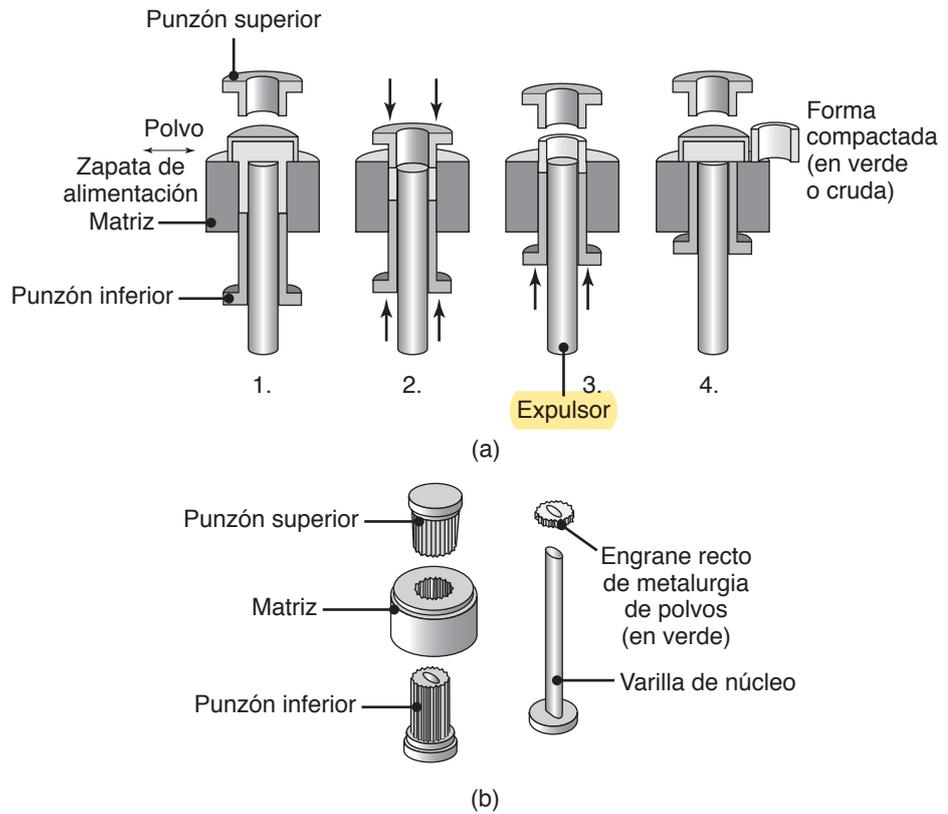


FIGURA 17.9 (a) Compactación de polvo metálico para formar un buje; la pieza de polvo presionado se denomina comprimido en verde o crudo. (b) Herramienta típica y juego de matrices para compactar un engrane recto. Fuente: Reproducido con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.

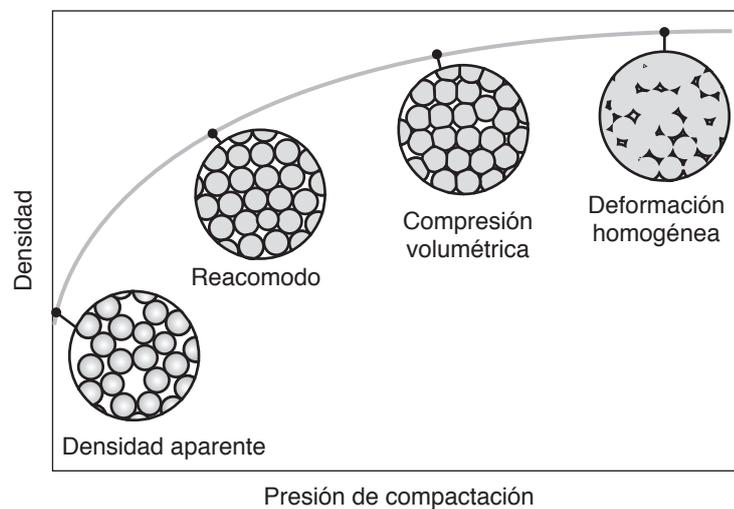


FIGURA 17.10 Compactación de polvos metálicos; a bajas presiones de compactación, el polvo se reacomoda sin deformarse, lo cual conduce a una alta rapidez de aumento de la densidad. Una vez que los polvos se compactan en forma más estrecha, se produce deformación plástica en sus interfaces, esto conduce a aumentos adicionales de la densidad pero a rapidezces menores. A densidades muy altas, el polvo se comporta como un sólido a granel.

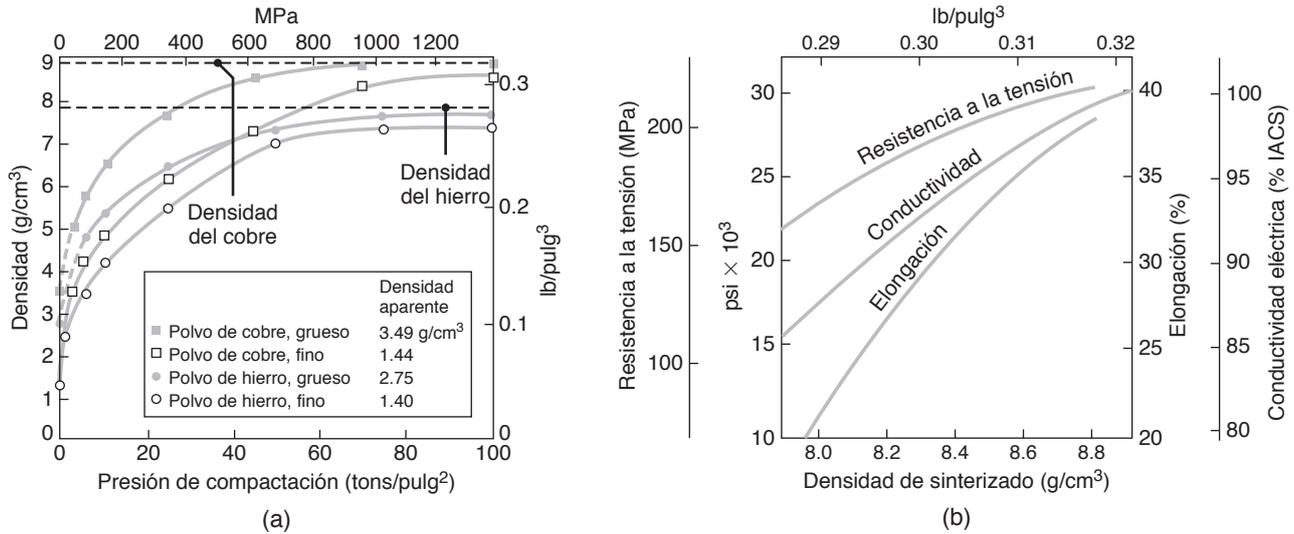


FIGURA 17.11 (a) Densidad de los comprimidos de polvo de cobre y hierro como una función de la presión de compactación; la densidad influye en gran medida sobre las propiedades mecánicas y físicas de las piezas de metalurgia de polvos. (b) Efecto de la densidad sobre la resistencia a la tensión, elongación y conductividad eléctrica del polvo de cobre. Fuente: (a) Según F. V. Lenel. (b) Según la Norma Internacional de Cobre Recocido (IACS, por sus siglas en inglés) para la conductividad eléctrica.

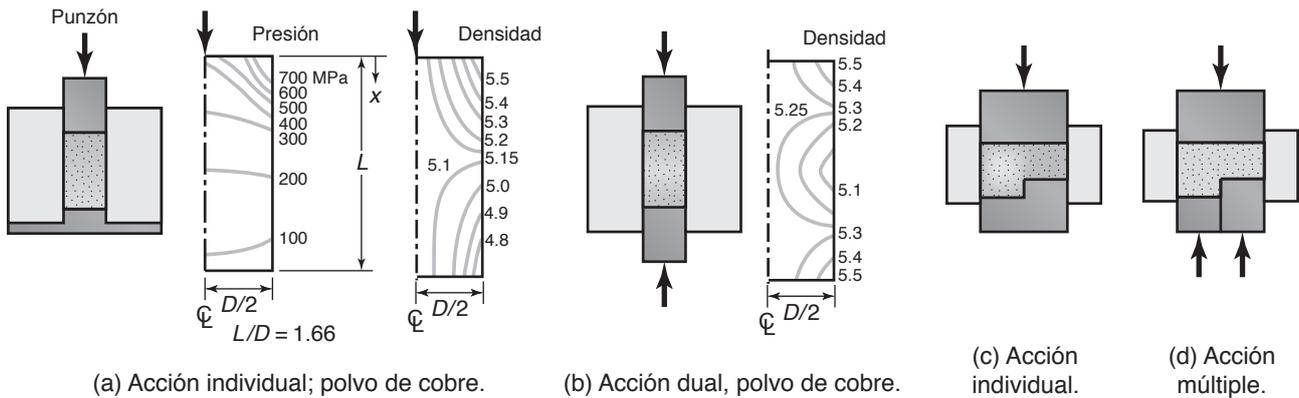


FIGURA 17.12 Variación de la densidad al compactar polvos metálicos en diversas matrices.

Cuanto mayor sea la densidad de la pieza compactada, más grandes serán su resistencia y su módulo de elasticidad (figura 17.11b). La razón es que entre más grande es la densidad, mayor es la cantidad de metal sólido presente en el mismo volumen y, por lo tanto, su resistencia es mayor. Debido a la fricción entre (a) las partículas de metal en el polvo y (b) las superficies del punzón y las paredes del molde o matriz, la densidad que haya dentro de la pieza puede variar considerablemente. Es posible minimizar esta variación mediante el diseño adecuado del punzón y de los moldes o matrices, así como por el control de la fricción. Por lo tanto, puede ser necesario el uso de varios punzones, cada uno con movimientos independientes, para garantizar que la densidad sea más uniforme en toda la pieza (figura 17.12). Recuerde un análisis similar efectuado con respecto a la compactación de la arena en la fabricación de moldes (vea la figura 11.7). Por otro lado, en algunas piezas compactadas, como engranes y levas, las variaciones de densidad pueden ser deseables. Por ejemplo, pueden aumentarse las densidades en ubicaciones críticas donde se requiera alta resistencia tanto mecánica como al desgaste.

TABLA 17.1

Presiones de compactación para diversos polvos	
Material	Presión (MPa)
Metales	
Aluminio	70-275
Latón	400-700
Bronce	200-275
Hierro	350-800
Tantalio	70-140
Tungsteno	70-140
Otros materiales	
Óxido de aluminio	110-140
Carbono	140-165
Carburos cementados	140-400
Ferritas	110-165

Distribución de la presión durante la compactación. Como puede verse en la figura 17.12, durante la presión la compactación decae rápidamente lejos de las superficies de las herramientas. Es posible demostrar que, en una prensa de acción simple, la distribución de la presión a lo largo de la longitud del comprimido es

$$p_x = p_o e^{-4\mu kx/D}, \tag{17.1}$$

donde μ es el coeficiente de fricción entre las partículas y la pared del contenedor, k es un factor que indica la fricción entre partículas durante la compactación, D es el diámetro compacto y p es la presión en la dirección de compactación, x . Observe que en la parte inferior del punzón la presión es p_o . La ecuación (17.1) también incluye una variable a tener en cuenta para la fricción entre partículas, la cual está dada por

$$\sigma_r = kp_x,$$

donde σ_r es el esfuerzo en la dirección radial. Si no hay fricción entre las partículas, $k = 1$, el polvo se comporta como un fluido y, por lo tanto, $\sigma_r = p_x$, lo que implica un estado de presión hidrostática. Si existe una fricción muy alta, $k = 0$, y la presión será baja cerca del punzón. Se puede observar a partir de la ecuación (17.1), que la presión decae dentro del comprimido a medida que aumentan el coeficiente de fricción, el parámetro k y la relación de longitud a diámetro. La presión requerida para comprimir polvos metálicos varía típicamente desde 70 MPa (10 ksi) para el aluminio hasta 800 MPa (120 ksi) para las piezas de hierro de alta densidad (vea la tabla 17.1).



FIGURA 17.13 Prensa mecánica de 7.3 MN (825 ton) para la compactación de polvo metálico. Fuente: Corte-sía de Cincinnati Incorporated.

17.3.1 Equipo

Las capacidades aproximadas de las prensas que se utilizan en la metalurgia de polvos se encuentran generalmente entre 1.8 y 2.7 MN (200 y 300 ton), aunque se utilizan prensas con capacidades mucho más altas para aplicaciones especiales. La mayoría de las aplicaciones requieren en realidad menos de 100 toneladas. Para tonelajes pequeños, se utilizan prensas mecánicas de manivela o excéntricas; para capacidades mayores, se emplean prensas de palanca o de rótula (vea la figura 14.19b). Para las piezas grandes, pueden usarse prensas hidráulicas (figura 17.13) con una capacidad de hasta 45 MN (5000 ton). La selección de la prensa depende del tamaño y de la configuración de la pieza, de los requisitos de densidad y de la tasa de producción. Sin embargo, cuanto mayor sea la velocidad de prensado, mayor será la tendencia de la prensa a atrapar aire en la cavidad de la matriz y, por lo tanto, a evitar la compactación adecuada.

17.3.2 Prensado isostático

Los comprimidos en verde pueden someterse a *presión hidrostática* para lograr una compactación y, por consiguiente, una densidad más uniformes. Las aplicaciones típicas incluyen camisas para cilindros de automóvil y piezas de alta calidad, como ejes de turbina, pivotes extremos de oleoductos y colectores de bombas, válvulas y cojinetes. En el **prensado isostático en frío** (CIP, por sus siglas en inglés), el polvo metálico se coloca en un molde de hule flexible (figura 17.14), generalmente hecho a partir de hule de neopreno, uretano, cloruro de polivinilo u otro elastómero (sección 7.9). Después, el ensamble se presuriza hidrostáticamente en una cámara usando, por lo general, agua. La presión más común es de 400 MPa (60 ksi), aunque pueden utilizarse presiones de hasta 1000 MPa (150 ksi). En la figura 17.15 aparecen los rangos para el prensado isostático en frío y otros métodos de compactación en términos del tamaño y la complejidad de la pieza.

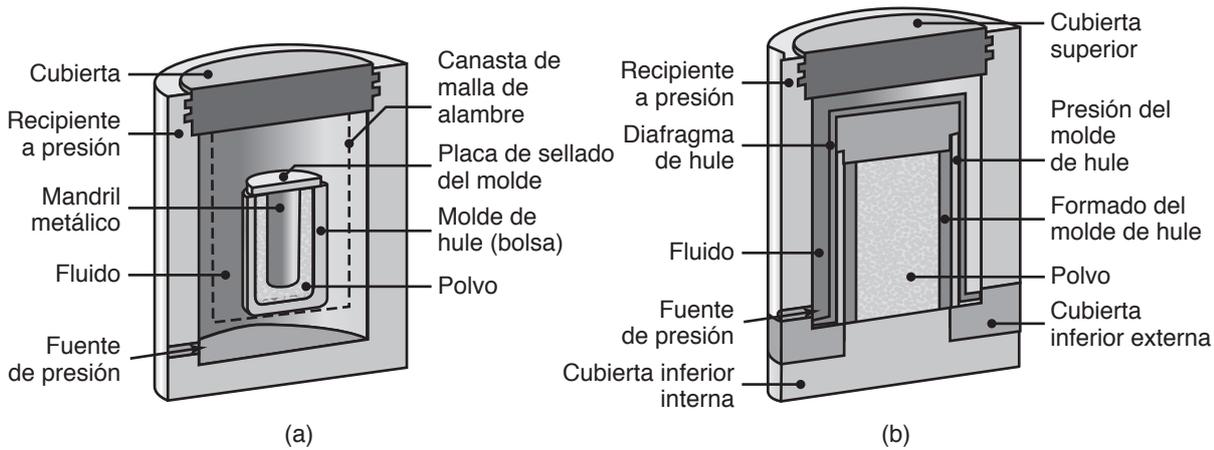


FIGURA 17.14 Diagramas esquemáticos de prensado isostático en frío; la presión se aplica isostáticamente dentro de una cámara a alta presión. (a) Proceso de bolsa húmeda para formar una pieza en forma de copa; el polvo está contenido en un recipiente flexible alrededor de una varilla de núcleo sólido. (b) Proceso de bolsa seca usada para formar un cilindro por metalurgia de polvos.

En el **prensado isostático en caliente** (HIP, por sus siglas en inglés), el recipiente suele estar hecho a partir de una lámina metálica con alto punto de fusión, generalmente de acero dulce o acero inoxidable, y el medio de presurización es un gas inerte o un fluido vítreo (tipo vidrio) a alta temperatura (figura 17.16). Las condiciones comunes para aplicar el prensado isostático en caliente son presiones de hasta 100 MPa (15 ksi), aunque pueden ser tres veces más altas, y temperaturas de 1200 °C (2200 °F). Las principales ventajas del HIP son su capacidad para producir comprimidos con densidades cercanas al 100%, una buena unión metalúrgica de las partículas y buenas propiedades mecánicas.

El proceso de HIP se utiliza principalmente para producir componentes de superaleaciones para las industrias aeroespacial y aeronáutica, así como en aplicaciones militares, médicas y químicas. También se usa (a) para cerrar la porosidad interna, (b) mejorar las propiedades en las superaleaciones y en las fundiciones de aleación de titanio del sector aeroespacial y (c) como paso final para la densificación del carburo de tungsteno en herramientas de corte y de los aceros para herramientas de metalurgia de polvos (capítulo 22).

Las principales ventajas del prensado isostático en caliente sobre la metalurgia de polvos convencional son:

- Debido a la uniformidad de la presión desde todas las direcciones y a la ausencia de fricción con las paredes de la matriz o el molde, produce comprimidos totalmente densos con estructura granular y densidad casi uniformes, independientemente de la forma de la pieza (por lo tanto, las propiedades son *isotrópicas*). Se han producido piezas con altas relaciones de longitud a diámetro, con densidad muy uniforme, resistencia, tenacidad y buen detalle superficial.
- El HIP es capaz de manejar piezas mucho más grandes que los procesos de compactación; por otro lado, tiene algunas limitaciones como:
 - Tolerancias dimensionales más altas que los otros métodos de compactación.
 - Costos de equipos más altos y tiempo de producción más largo que los otros procesos.
- El HIP sólo es aplicable a cantidades de producción relativamente pequeñas, por lo general de menos de 10 000 piezas al año.

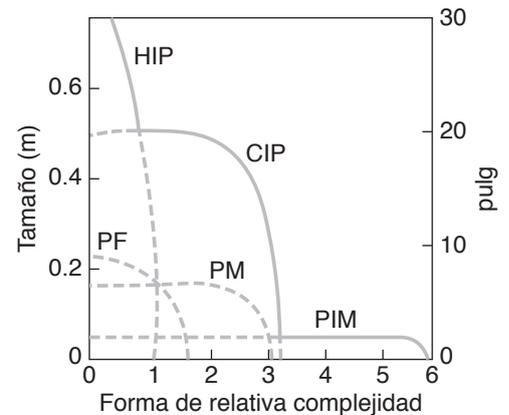


FIGURA 17.15 Capacidades disponibles, con respecto al tamaño de la pieza y la complejidad de la forma, de diversas operaciones de metalurgia de polvos. PF significa forjado de polvos. Fuente: Reproducida con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.



Código QR 17.2 Prensado isostático en caliente. (Fuente: Cortesía de la Metal Powder Industries Federation).

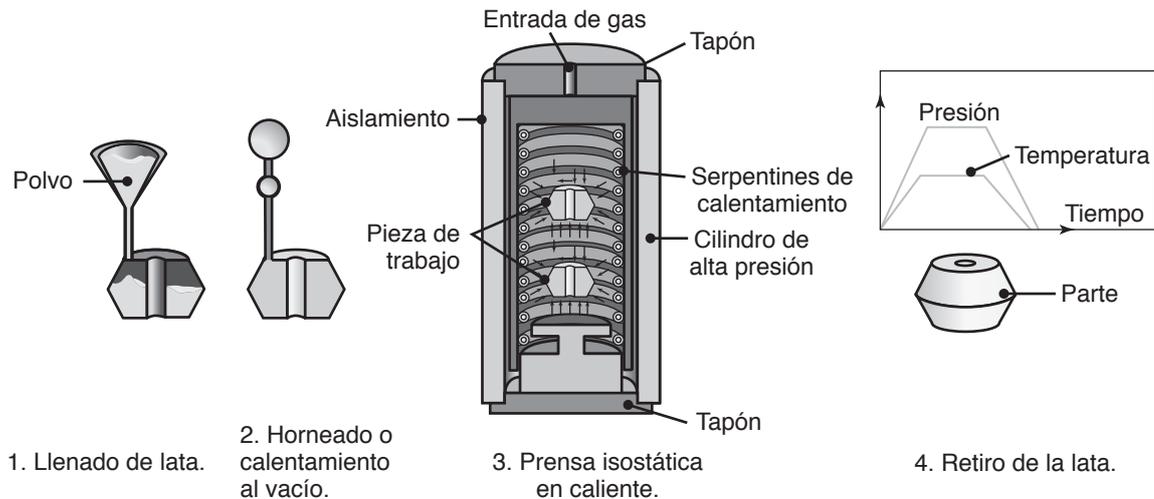


FIGURA 17.16 Ilustración esquemática del prensado isostático en caliente; en el diagrama se muestran las variaciones de la presión y la temperatura en función del tiempo (sin escala).

CASO DE ESTUDIO 17.1 Prensado isostático en caliente de un elevador de válvula

En la figura 17.17, se muestra un elevador de válvula revestido mediante prensado isostático en caliente y que se utiliza en una amplia gama de motores diesel para camiones de uso mediano a pesado. El elevador de válvula de 0.2 kg (0.45 lb) se monta en el árbol de levas y abre y cierra las válvulas del motor. Por consiguiente, es deseable tener una cara de carburo de tungsteno para adquirir resistencia al desgaste (WC, por las siglas en inglés para cara de desgaste) y un eje de acero para resistencia a la fatiga. Antes de que el elevador de válvula revestido por HIP fuera desarrollado, estas piezas se producían en un horno para soldadura fuerte (sección 32.2), pero dieron como resultado fallas ocasionales en campo y tasas de desecho relativamente altas.

Debido a que la producción anual requerida de estas piezas es de más de 400 000, las altas tasas de desecho son particularmente objetables.

La nueva pieza producida consiste en (a) una cara de carburo de tungsteno hecha de polvo (prensado y sinterizado) adherida con 9% de cobalto, (b) una tapa de hoja metálica de acero montada sobre el disco de la cara de desgaste, (c) una capa intermedia de aleación de cobre y aluminio y (d) un eje de acero. La tapa de acero se suelda mediante un haz de electrones en el eje de acero, luego el ensamble se prensa de manera isostática en caliente para proporcionar una unión muy fuerte. El HIP se lleva a cabo a 1010 °C (1850 °F) y a una presión de 100 MPa (15 000 psi). La superficie de carburo de tungsteno tiene

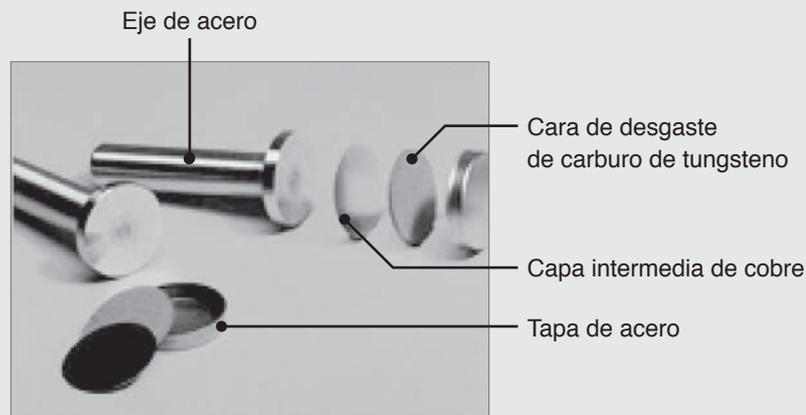


FIGURA 17.17 Elevador de válvula para motores diesel de uso pesado producido a partir de una tapa de carburo prensado de manera isostática en caliente sobre un eje de acero. Fuente: Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

una densidad de entre 14.52 y 14.72 g/cm³, una dureza de 90.8 ± 5 HRA y una mínima resistencia a la fractura transversal de 2450 MPa (355 000 psi).

Las operaciones secundarias se limitan a esmerilar la cara de desgaste para quitar cualquier protuberancia de la tapa de hoja metálica y exponer la cara de carburo de tungsteno resistente al desgaste. La alta confiabilidad de la unión HIP reduce en gran medida las tasas de desperdicio, hasta menos de 0.2%. No se han expe-

rimentado fallas en campo en más de cuatro años de producción plena. Además, los costos de producción se redujeron sustancialmente gracias al uso del prensado isostático en caliente.

Fuente: Reimpreso con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.

17.3.3 Diversos procesos de compactación y conformado

Moldeo por inyección de polvos. En el *moldeo por inyección de polvos* (PIM, por sus siglas en inglés), también llamado moldeo por inyección de metal (MIM, por sus siglas en inglés), polvos metálicos muy finos (< 10 μm) se mezclan con un polímero al 25-45% o un aglutinante a base de cera. Después, la mezcla se somete a un proceso similar al de la fundición en dado (sección 11.4.5; vea también *moldeo por inyección de plásticos* en la sección 19.3), donde se inyecta en el molde, a una temperatura de entre 135 y 200 °C (275 y 400 °F). Por lo general, las piezas tienen bebederos y canales, igual que las piezas moldeadas por inyección (figura 17.18) y, por lo tanto, se separan cuidadosamente antes de aplicarles algún procesamiento adicional. Las piezas moldeadas crudas o en verde se colocan en un horno a baja temperatura, para quemar el plástico (*desligado*), o el aglutinante se elimina por extracción con solvente. Con frecuencia, se puede retener una pequeña cantidad de aglutinante para proporcionar suficiente resistencia en verde o cruda y realizar la transferencia hacia un horno de sinterizado, donde las piezas se sinterizan (sección 17.4) a temperaturas tan altas como 1375 °C (2500 °F). También pueden realizarse operaciones adicionales como taponeo de agujeros, infiltración de metal y tratamiento térmico, según se requiera.

Por lo general, los metales adecuados para el moldeo por inyección de polvos son aquellos que se funden a temperaturas por encima de 1000 °C (1830 °F), como el carbono y los aceros inoxidables, aceros para herramientas, cobre, bronce y titanio. Las piezas típicas que se fabrican son componentes para relojes, cañones para armas de calibre pequeño, anillos de montaje para las miras telescópicas de los rifles, bisagras para puertas, impulsores de sistemas de rociadores y cuchillos quirúrgicos.

Las principales ventajas del PIM sobre la compactación convencional son:

- Se pueden moldear formas complejas, con espesores de pared tan pequeños como 5 mm (0.2 pulg), que se retiran fácilmente de los moldes.
- Las propiedades mecánicas son casi iguales a las de los productos forjados.
- Las tolerancias dimensionales son buenas.
- Pueden lograrse altas tasas de producción mediante el uso de matrices con cavidades múltiples (vea las figuras 11.22 y 19.10).
- Las piezas producidas por el proceso PIM compiten bien con piezas pequeñas fundidas por revestimiento y forjadas, así como con piezas complejas maquinadas. Sin embargo, este proceso no compete bien con las fundiciones en dado de zinc y aluminio (sección 11.4.5) ni con el maquinado de tornillo (sección 23.3.4).

Las principales limitaciones del moldeo por inyección de polvos son su alto costo para las corridas de producción pequeñas y la necesidad de utilizar polvos metálicos finos.

Un ejemplo en el que las ventajas del moldeo por inyección de metal son evidentes es la producción de engranes de trabajo ligero, como equipos de oficina, donde la carga y la potencia son bajas. Un engrane de bajo costo puede producirse directamente a partir del moldeo por inyección de metal, en vez de fabricarlo con una pieza en bruto, por ejemplo, fundida o forjada, seguida de operaciones de maquinado y acabado (sección 24.7).



Código QR 17.3 Descripción general del moldeo por inyección de metal. (*Fuente:* Cortesía de la Metal Powder Industries Federation).



FIGURA 17.18 Muestra de cuatro componentes moldeados por inyección de metal con bebedero, canales y ataques (vea también la figura 19.10). *Fuente:* Cortesía de HARBEC, Inc.

Evitar los altos costos de maquinado resulta en ahorros importantes; sin embargo, este enfoque puede no ser adecuado para las aplicaciones más exigentes, como transmisiones de potencia para automóviles o bombas de engranes.

CASO DE ESTUDIO 17.2 Componentes del teléfono móvil fabricados mediante moldeo por inyección de metal

La figura 17.19 muestra los componentes de metalurgia de polvos utilizados en los teléfonos móviles y que les permiten ser plegables. Estos componentes se producen a partir de acero inoxidable 17-4 PH (endurecido por precipitación, sección 5.6) con densidad final de 7.6 g/cm^3 , dureza de 30 HRC y resistencia a la tensión de 172 ksi. Las piezas que se muestran son de manufactura compleja, por lo que son candidatas ideales para el MIM. La complejidad surge porque para hacer estas piezas deben ensamblarse múltiples componentes; por lo tanto, tienen costos de producción elevados. Las piezas se producen dentro de un máximo de 0.23% de tolerancia lineal.

Estos componentes son parte integral del mecanismo único de apertura desarrollado por el teléfono móvil Motorola PEBL. La bisagra doble consiste en el barril central y en un collarín que se extiende para

alojar ranuras intrincadas y los extremos con las dos patas rectas. Esta característica permite la apertura en un solo movimiento de la carcasa plegable del teléfono móvil. Para llevar a cabo esta función, los componentes deben tener flexibilidad en su diseño y resistencia en sus materiales. La única otra opción de proceso era el maquinado, que habría requerido la utilización de un material considerablemente superior y un costo adicional estimado en cinco veces el costo de los componentes moldeados por inyección de metal. Las piezas, según se diseñaron, han completado con éxito las pruebas de vida acelerada.

Fuente: Reimpreso con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.



FIGURA 17.19 Componentes de metal en polvo para teléfonos móviles y que les permiten ser plegables.

Forjado. En el *forjado de polvos* (PF, por sus siglas en inglés), la pieza producida a partir de la compactación y el sinterizado sirve como *preforma* en una operación de forjado en caliente. Los productos forjados son casi completamente densos y tienen buen acabado superficial, buenas tolerancias dimensionales y tamaños de grano uniformes y finos. Las propiedades superiores obtenidas con el PF lo hacen particularmente adecuado para aplicaciones como piezas automotrices sometidas a grandes esfuerzos, bielas y componentes de motores a reacción.

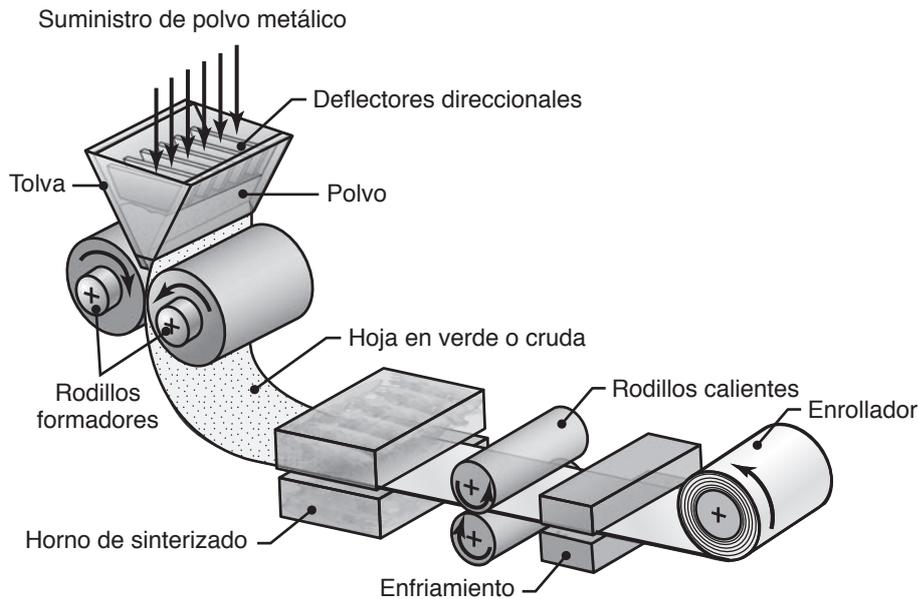


FIGURA 17.20 Ilustración del laminado de polvo metálico.

Laminado. En el *laminado de polvo*, también llamado *compactación por rodillo*, el polvo metálico se introduce en el espacio que hay entre los rodillos de un molino de laminado con dos niveles (figura 17.20) y se compacta en una tira continua a velocidades de hasta 0.5 m/s (100 pies/min). La operación de laminado puede llevarse a cabo a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas. Mediante este proceso pueden hacerse hojas metálicas para componentes eléctricos y electrónicos y para el acuñado de monedas.

Extrusión. Los polvos pueden compactarse por *extrusión*, un proceso donde se confinan en un contenedor metálico y son extruidos en caliente. Después del sinterizado, las piezas pueden recalentarse y forjarse en un dado cerrado (sección 14.3) hasta su forma final. Los polvos superaleados, por ejemplo, son extruidos en caliente con el fin de mejorar sus propiedades.

Compactación sin presión. En esta operación, el molde o matriz se llena por gravedad con polvo metálico, el cual se sinteriza posteriormente de manera directa en el molde. Debido a la baja densidad resultante, la compactación sin presión se utiliza principalmente para piezas metálicas porosas, como los filtros.

Deposición por rocío. Éste es un proceso de generación de forma (figura 17.21) que implica (a) un atomizador, (b) una cámara de pulverización o rocío, con una atmósfera inerte, y (c) un molde para la producción de preformas. El molde puede hacerse en varias formas, como palanquillas, tubos, discos y cilindros. Aunque hay algunas variaciones, el *proceso Osprey* es el más conocido y se muestra en la figura 17.21. Después, el metal se atomiza y deposita sobre un molde de preforma enfriado, generalmente de cobre o de material cerámico, donde el metal se solidifica. Las partículas de metal se unen entre sí, desarrollando una densidad que suele estar por encima del 99% de la densidad del metal sólido. Las formas obtenidas por deposición por rocío pueden someterse a procesos adicionales para conformar y consolidar la pieza, como forjado, laminado y extruido. El tamaño de grano de la pieza es fino y sus propiedades mecánicas son comparables a las de los productos forjados hechos con la misma aleación.

Moldes cerámicos. Los moldes *cerámicos* utilizados para conformar polvos metálicos se hacen aplicando la misma técnica de la fundición por revestimiento (sección 11.3.2). Después

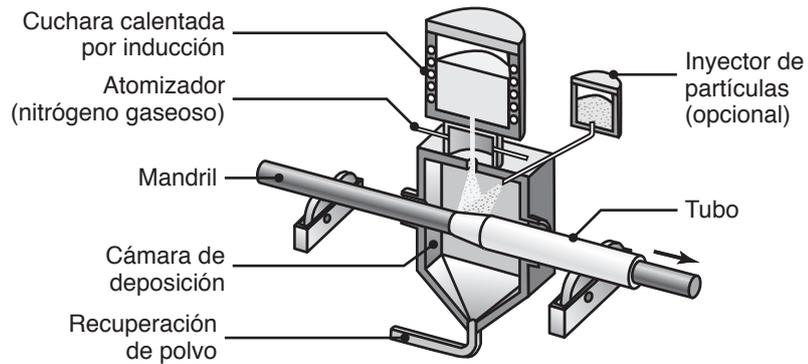


FIGURA 17.21 Deposición por rocío (*proceso Osprey*) donde el metal fundido se rocía sobre un mandril giratorio para producir tubos sin costura.

de hacer el molde, se llena con polvo metálico y se coloca en un recipiente de acero. El espacio entre el molde y el recipiente se llena con material en forma de partículas. El recipiente se evacua, se cierra herméticamente y se somete a prensado isostático en caliente. Mediante este proceso, se han hecho rotores de compresor de aleación de titanio para motores de misil.

Compactación dinámica y explosiva. Algunos polvos metálicos que son difíciles de compactar con suficiente resistencia en verde o cruda pueden compactarse rápidamente hasta cerca de la densidad completa usando la configuración que se muestra en la figura 17.22. El explosivo impulsa una masa hacia el polvo en verde a altas velocidades, lo cual genera una onda de choque que desarrolla presiones de hasta 30 GPa. La onda de choque atraviesa la pieza de metal en polvo a velocidades de hasta 6 km/s. Con frecuencia, se practica el precalentamiento del polvo para evitar fracturas.

Síntesis por combustión. La *síntesis por combustión* aprovecha la naturaleza altamente combustible de los polvos metálicos al colocar un polvo ligeramente compactado en un recipiente a presión. Después, se introduce una fuente de ignición, como un arco a partir de un electrodo de tungsteno, que enciende el polvo. La explosión produce una onda de

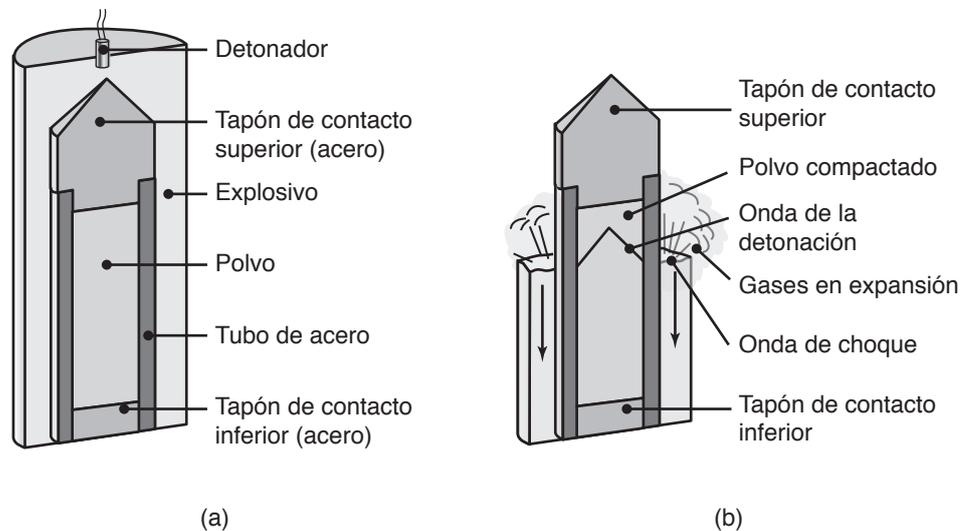


FIGURA 17.22 Ilustración esquemática de la compactación explosiva. (a) Un tubo llenado con polvo se rodea con medios explosivos dentro de un contenedor, normalmente de cartón o madera. (b) Después de la detonación, una onda de compresión sigue a la onda de la detonación, lo que resulta en una pieza de polvo metálico compactado.

choque que viaja a través del comprimido desarrollando calor y presión suficientes como para compactar el polvo metálico.

Prensado pseudoisostático. En el *prensado pseudoisostático*, una preforma se precalienta rodeada por gránulos de material cerámico o grafito calientes y se coloca en un contenedor. Una prensa mecánica compacta los gránulos y la preforma. (Tenga en cuenta que los gránulos son grandes y no pueden penetrar en los poros de la pieza de metalurgia de polvos). La compactación es uniaxial, pero debido a la presencia del cerámico, la carga sobre la preforma es multiaxial. Esta técnica tiene tiempos de ciclo más cortos que el prensado isostático en caliente, pero debido a que la presión no es estrictamente hidrostática, los cambios dimensionales ocurridos durante la compactación no son uniformes.

Sinterizado selectivo por láser. Algunas piezas de metalurgia de polvos pueden producirse mediante sinterizado selectivo por láser, una *operación de prototipado rápido* que se describe con detalle en la sección 20.3.4.

17.3.4 Materiales de punzón y matriz

La selección de los materiales adecuados para fabricar el punzón y la matriz a utilizar en la metalurgia de polvos depende de la abrasividad del metal en polvo y del número de piezas a producir. Los materiales para matrices más comunes son los aceros de herramienta endurecidos al aire o en aceite, como D2 o D3, con un rango de dureza de 60 a 64 HRC (tabla 5.8). Debido a su mayor dureza y resistencia al desgaste, las matrices de carburo de tungsteno se utilizan para las aplicaciones más severas. Por lo general, los punzones se hacen de materiales similares.

El control estricto de las dimensiones de la matriz y del punzón resulta esencial para la compactación adecuada y la vida de la matriz. Una holgura o tolerancia dimensional demasiado grande entre el punzón y la matriz permitirá que el polvo metálico entre en el espacio, donde interferirá severamente con la operación y causará que las piezas se salgan de su centro. Por lo general, las holguras diametrales son menores a $25\ \mu\text{m}$ (0.001 pulg). Las superficies de la matriz y el punzón deben recubrirse o pulirse —en la dirección de los movimientos de la herramienta en la matriz— para mejorar la vida del equipo y el rendimiento general.

17.4 Sinterizado

Tal como se describe en la sección 17.3, el *comprimido en verde* o crudo es frágil y su resistencia en verde es baja. El *sinterizado* es un proceso mediante el cual se calientan comprimidos en verde, en un horno de atmósfera controlada, a una temperatura por debajo del punto de fusión del metal, pero lo suficientemente alta como para permitir la unión (fusión) de las partículas individuales e impartir resistencia a la pieza. La naturaleza y la fuerza de la unión entre las partículas y, por ende, la del comprimido sinterizado, involucran los complejos mecanismos de la difusión, el flujo plástico, la evaporación de los materiales volátiles en el comprimido, la recristalización, el crecimiento del grano y el grado de contracción de los poros.

Las principales variables involucradas en el sinterizado son la temperatura, el tiempo y la atmósfera del horno. Por lo general, las temperaturas de sinterizado (tabla 17.2) se encuentran entre el 70 y 90% del punto de fusión del metal o de la aleación (vea la tabla 3.1). Los tiempos de sinterizado (tabla 17.2) van desde un mínimo de aproximadamente 10 minutos para el hierro y las aleaciones de cobre hasta un máximo de ocho horas para el tungsteno y el tantalio.

Los hornos de sinterizado continuo, que se utilizan para la mayor parte de la producción, tienen tres cámaras:

1. *Cámara de quemado*, para volatilizar los lubricantes presentes en el comprimido en verde con el fin de mejorar la resistencia de la unión y evitar la formación de grietas.
2. *Cámara de alta temperatura*, para el sinterizado.
3. *Cámara de enfriamiento*.

TABLA 17.2

Temperatura y tiempo de sinterizado para diversos metales

Material	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Cobre, latón y bronce	760-900	10-45
Hierro y hierro-grafito	1000-1150	8-45
Níquel	1000-1150	30-45
Aceros inoxidable	1100-1290	30-60
Aleaciones Alnico (para imanes permanentes)	1200-1300	120-150
Ferritas	1200-1500	10-600
Carburo de tungsteno	1430-1500	20-30
Molibdeno	2050	120
Tungsteno	2350	480
Tantalio	2400	480

Para obtener propiedades óptimas, el control adecuado de la atmósfera del horno resulta esencial para el éxito del sinterizado. Se requiere un ambiente libre de oxígeno para controlar la carburación y descaburación de los comprimidos de hierro y basados en hierro, y para evitar la oxidación de los polvos. Por lo general, se usa un vacío para el sinterizado de aleaciones de metal refractario y para aceros inoxidable. Los gases que se usan con más frecuencia en el sinterizado son el hidrógeno, amoníaco disociado o quemado, gases de hidrocarburos parcialmente quemados y nitrógeno.

Los mecanismos de sinterizado dependen de la composición de las partículas metálicas tanto como de los parámetros de procesamiento. Estos mecanismos son la *difusión*, el *transporte en fase vapor* y el *sinterizado en fase líquida*. A medida que aumenta la temperatura, dos partículas de polvo adyacentes comienzan a formar una unión o liga mediante un **mecanismo de difusión** (*unión de estado sólido*, figura 17.23a). Como resultado, aumentan la resistencia, la densidad, la ductilidad y las conductividades térmica y eléctrica del comprimido. Sin embargo, al mismo tiempo el comprimido se reduce, por lo que deberán tenerse en cuenta holguras o tolerancias dimensionales para la contracción, como se hace en la fundición.

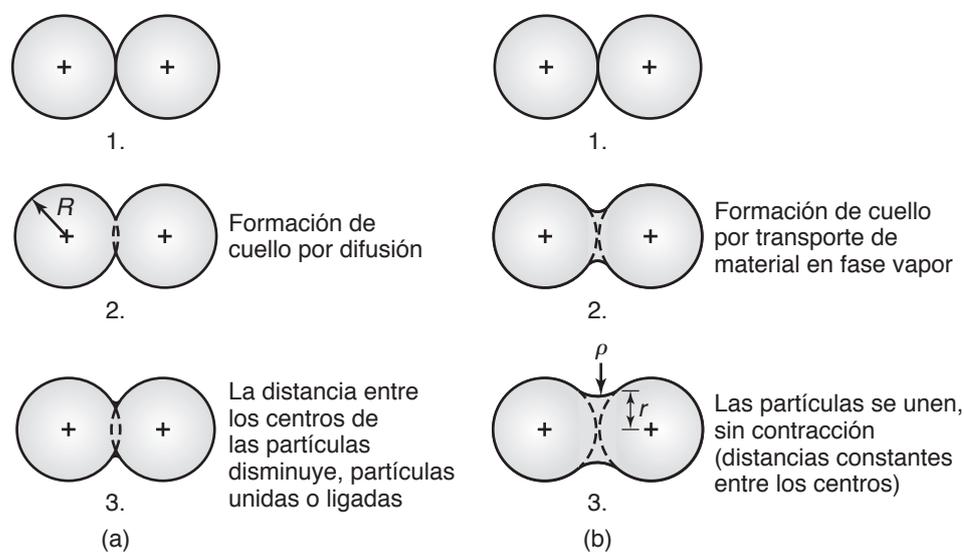


FIGURA 17.23 Ilustración esquemática de dos mecanismos para el sinterizado de polvos metálicos: (a) transporte de material en estado sólido y (b) transporte de material en fase vapor. R = radio de la partícula, r = radio del cuello y ρ = radio del perfil del cuello.

Un segundo mecanismo de sinterizado es el **transporte en fase vapor** (figura 17.23b). Debido a que el material se calienta hasta cerca de su temperatura de fusión, las partículas liberarán átomos de metal en fase de vapor. En geometrías convergentes (la interfase de dos partículas), la temperatura de fusión es superior a nivel local y la fase de vapor se vuelve a solidificar. Por lo tanto, la interfase crece y se fortalece, mientras que cada partícula se reduce como un todo.

Si dos partículas adyacentes son de diferentes metales, pueden presentarse aleaciones en la interfase de las dos partículas. Si una de las partículas tiene un punto de fusión más bajo que la otra, se fundirá y, por causa de la tensión superficial, rodeará la partícula que no se haya fundido (figura 17.24). Un ejemplo de este mecanismo, conocido como *sinterizado en fase líquida*, es el cobalto en herramientas y troqueles de carburo de tungsteno (vea la sección 22.4), de esta manera también pueden obtenerse piezas más resistentes y densas. En el *sinterizado por chispa*, se colocan polvos metálicos sueltos en un molde de grafito, se calientan mediante una corriente eléctrica, se someten a una descarga de alta energía y se compactan, todo en un solo paso. Otra técnica es el *sinterizado por microondas*, el cual reduce el tiempo de sinterizado y, por lo tanto, evita el crecimiento de grano, lo que puede afectar negativamente la resistencia.

Propiedades mecánicas. En función de la temperatura, el tiempo e historial de procesamiento, es posible obtener diferentes estructuras y porosidades en un comprimido sinterizado, lo que afecta sus propiedades. La porosidad no puede eliminarse por completo porque (a) hay huecos que permanecen después de la compactación y (b) durante el sinterizado se desarrollan gases. La porosidad puede consistir en una *red* de poros interconectados o en *orificios cerrados*. En general, si la densidad del material es menor al 80% de su densidad aparente, los poros estarán interconectados. Aunque la porosidad reduce la resistencia de un producto de metalurgia de polvos, es una característica importante en la fabricación de filtros de metal y cojinetes y para permitir la infiltración con lubricantes líquidos por tensión superficial.

En la tabla 17.3 se proporcionan las propiedades mecánicas típicas de diversas aleaciones de metalurgia de polvos sinterizadas. Las diferencias en las propiedades mecánicas de los metales forjados frente a los metales de PM se proporcionan en la tabla 17.4. Con el fin de evaluar las diferencias entre las propiedades de aleaciones metálicas obtenidas por PM, por forjado y por fundición, compare estas tablas con las de las partes I y II de este libro.

En la tabla 17.5 se muestran los efectos de diversos procesos de manufactura en las propiedades mecánicas de una aleación de titanio. Observe que el titanio prensado en caliente de manera isostática tiene propiedades semejantes a las del titanio fundido y forjado. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, a menos que el forjado sea a precisión, las piezas forjadas suelen requerir algún maquinado adicional u operaciones de acabado que normalmente no necesita un componente de metalurgia de polvos.

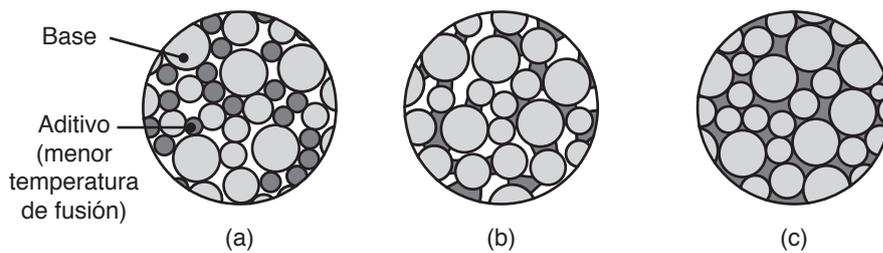


FIGURA 17.24 Ilustración esquemática del sinterizado en fase líquida utilizando una mezcla de dos polvos. (a) Comprimido crudo de un metal base con un punto de fusión más alto y un aditivo a temperatura más baja; (b) fusión líquida, humectación y precipitación repetida en las superficies; (c) material sólido completamente sinterizado.

TABLA 17.3

Propiedades mecánicas de los materiales seleccionados que se fabrican por metalurgia de polvos

Material	Resistencia a la cedencia (MPa)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Dureza	Elongación en 25 mm (%)	Densidad (g/cm ³)	Notas
Ferroso							
F-0008-20	170	200	85	35 HRB	<1	5.8	El F-008 suele ser el más rentable. Cobre añadido para resistencia mecánica, dureza y resistencia al desgaste. Buena resistencia con tratamiento térmico, energía de impacto.
F-0008-35	260	390	140	70 HRB	1	7.0	
F-0008-55HT		450	115	22 HRC	<1	6.3	
F-0008-85HT		660	150	35 HRC	<1	7.1	
FC-0008-30	240	240	85	50 HRB	<1	5.8	
FC-0008-60	450	520	155	84 HRB	<1	7.2	
FC-0008-95		720	150	43 HRC	<1	7.1	
FN-0205-20	170	280	115	44 HRB	1	6.6	
FN-0205-35	280	480	170	78 HRB	5	7.4	
FN-0205-180HT		1280	170	78 HRB	<1	7.4	
FX-1005-40	340	530	160	82 HRB	4	7.3	
FX-1005-110HT		830	160	38 HRC	<1	7.3	Acero infiltrado con cobre.
Acero inoxidable							
SS-303N1-38	310	470	115	70 HRB	5	6.9	Buena maquinabilidad.
SS-304N1-30	260	300	105	61 HRB	<1	6.4	Alta resistencia a la corrosión.
SS-316N1-25	230	280	105	59 HRB	<1	6.4	Buena aleación de propósito general.
SS-316N2-38	310	480	140	65 HRB	131	6.9	
Cobre y aleaciones de cobre							
CZ-1000-9	70	120	80	65 HRH	9	7.6	Piezas estructurales de propósito general.
CZ-1000-11	80	160	100	80 HRH	12	8.1	Piezas estructurales de propósito general.
CZP-3002-14	110	220	90	88 HRH	16	8.0	Piezas estructurales de alta resistencia.
CT-1000-13	110	150	60	82 HRH	4	7.2	Material de soporte común autolubricado.
Aleaciones de aluminio							
Ax 123-T1	200	270	—	47 HRB	3	2.7	Piezas estructurales de propósito general.
Ax 123-T6	390	400	—	72 HRB	<1	2.7	
Ax 231-T6	200	220	—	55 HRB	1	2.7	Alta resistencia al desgaste.
Ax 231-T6	310	320	—	77 HRB	<1	2.7	
Ax 431-T6	270	300	—	55 HRB	5	2.8	Piezas estructurales de alta resistencia.
Ax 431-T6	440	470	—	80 HRB	2	2.8	
Aleaciones de titanio							
Ti-6Al-4V (HIP)	917	827	—	—	—	13	
Superaleaciones							
Estelita 19	—	1035	—	—	49 HRC	<1	

17.5 Operaciones secundarias y de acabado

Con el fin de mejorar aún más las propiedades de los productos fabricados por metalurgia de polvos y sinterizados o para impartir características especiales, pueden realizarse diversas operaciones adicionales después del sinterizado:

1. El **acuñado** y el **dimensionamiento** son operaciones de compactación realizadas bajo alta presión en prensas. Los propósitos de estas operaciones son impartir precisión dimensional a la pieza sinterizada y mejorar su resistencia y acabado superficial aumentando su densidad (densificación) posteriormente.
2. Los comprimidos de polvos de aleación *preformados* y *sinterizados* pueden forjarse posteriormente en frío o en caliente y, en ocasiones, mediante *forjado por impacto*

TABLA 17.4

Comparación de las propiedades mecánicas de los metales forjados seleccionados y su equivalencia en la metalurgia de polvos (después del sinterizado)

Metal	Condición	Densidad relativa ^a (%)	Resistencia máxima a la tensión ^a (MPa)	Elongación en 50 mm (%)
Aluminio 2014-T6	Forjado (W)	100	480	20
	PM	94	330	2
6061-T6	W	100	310	15
	PM	94	250	2
Cobre, OFHC ^b	W, recocido	100	235	50
	PM	89	160	8
Latón, 260	W, recocido	100	300	65
	PM	89	255	26
Acero, 1025	W, laminado en caliente	100	590	25
	PM	84	235	2
Acero inoxidable, 303	W, recocido	100	620	50
	PM	82	360	2

Notas: ^aLa densidad y la resistencia de los materiales fabricados por metalurgia de polvos aumentan en gran medida con un procesamiento posterior, como forjado, prensado isostático y tratamiento térmico. ^bOFHC significa libre de oxígeno, alta conductividad.

TABLA 17.5

Comparaciones de las propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti-6Al-4V

Proceso*	Densidad relativa (%)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Elongación (%)	Reducción de área (%)
Fundición	100	840	930	7	15
Fundición y forjado	100	875	965	14	40
Mezclado elemental (P + S)	98	786	875	8	14
Mezclado elemental (HIP)	>99	805	875	9	17
Prealeado (HIP)	100	880	975	14	26
Fusión por haz de electrones	100	910	970	16	—

* P + S significa prensado y sinterizado, HIP significa prensado en caliente de manera isostática. Fuente: Cortesía de R. M. German and Strataysys, Inc.

hasta las formas finales deseadas. Estos productos tienen buen acabado superficial y buenas tolerancias dimensionales, así como un tamaño de grano fino y uniforme. Las propiedades superiores obtenidas hacen que esta tecnología sea especialmente adecuada para aplicaciones como componentes automotrices y motores de reacción sometidos a grandes esfuerzos.

3. Las piezas de metal en polvo pueden someterse a otras operaciones de acabado, como:
 - **Maquinado**, para la producción de diversas características geométricas mediante fresado, taladrado y machueleado.
 - **Rectificado**, para mejorar la precisión dimensional y el acabado superficial.
 - **Deposición**, para mejorar la apariencia y la resistencia al desgaste y a la corrosión.
 - **Tratamiento térmico**, para incrementar la dureza y la resistencia.
4. La porosidad inherente de los componentes obtenidos por metalurgia de polvos puede utilizarse para la **impregnación** con un fluido. Los cojinetes y bujes que se lubrican internamente, con hasta 30% de aceite en volumen, se hacen mediante

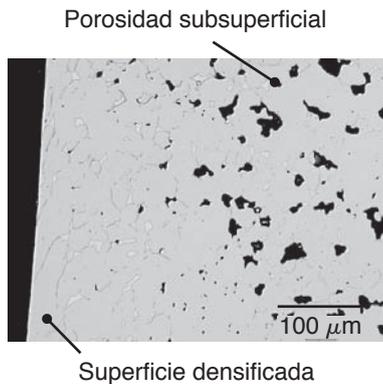


FIGURA 17.25 Micrografía de la superficie de un material de PM después de su densificación con rodillo; observe la baja porosidad cerca de la superficie, lo que incrementa la capacidad de los materiales para soportar los esfuerzos de contacto y resistir la fatiga. Fuente: Cortesía de Capstan Atlantic Corp.

la inmersión del cojinete sinterizado en aceite caliente. Los cojinetes tienen un suministro continuo de lubricante durante su vida de servicio debido a la acción capilar (también conocida como *lubricación permanente*). Las juntas universales, por ejemplo, se hacen con técnicas de metalurgia de polvos de impregnación de grasa, por lo que ya no se requiere el engrasado tradicional de las articulaciones o juntas.

5. La **infiltración** es un proceso mediante el cual se coloca una masa de metal con bajo punto de fusión en contacto con la pieza sinterizada. Enseguida, el conjunto se calienta a una temperatura lo suficientemente alta como para fundir dicha masa. El metal fundido se infiltra en los poros por acción capilar, produciendo una zona relativamente libre de poros con buena densidad y resistencia. La aplicación más común es la infiltración de comprimidos a base de hierro mediante cobre o bronce. Las ventajas de la infiltración son mejoría en la dureza y en la resistencia a la tensión de la pieza, además el llenado de los poros evita la penetración de humedad que podría causar corrosión. Por otra parte, debido a que cierta porosidad resulta esencial cuando se usa un infiltrante, la pieza puede sinterizarse sólo parcialmente, lo cual resulta en una deformación térmica inferior.
6. La **electrodeposición** (sección 34.9) puede aplicarse sobre piezas de metalurgia de polvos, pero requiere un cuidado especial para eliminar completamente el líquido electrolítico ya que éste presenta riesgos para la salud. Bajo algunas condiciones, la electrodeposición puede sellar una pieza y eliminar su permeabilidad.
7. La **densificación**, o **densificación con rodillo**, es similar al bruñido con rodillo (sección 34.2), donde un rodillo duro de diámetro pequeño se presiona contra una pieza de metalurgia de polvos, resultando en presiones de contacto lo suficientemente altas como para causar la deformación plástica de sus capas superficiales. Por lo tanto, en vez de trabajar la pieza en frío, el efecto es causar un aumento en la densidad, o densificación, de las capas superficiales (figura 17.25). Por lo general, los engranes y cojinetes hechos por metalurgia de polvos se tratan mediante densificación con rodillo, puesto que de esta manera la capa superficial es más resistente a la fatiga y más capaz de soportar esfuerzos de contacto mucho más altos que los componentes no tratados.

17.6 Consideraciones de diseño

Debido a las propiedades únicas de los polvos metálicos, a sus características de flujo en la matriz y a la fragilidad de los comprimidos en verde, hay ciertos principios de diseño que deben seguirse (figuras 17.26 a 17.28):

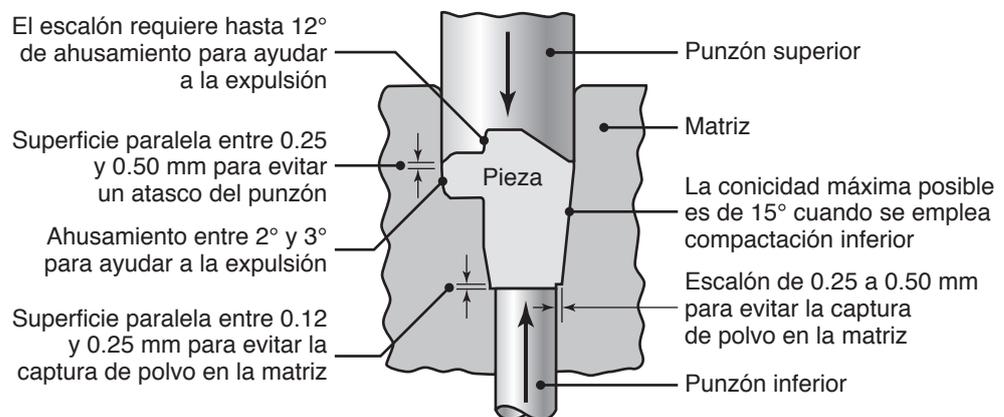


FIGURA 17.26 Geometría de la matriz y características de diseño para la compactación de polvo metálico. Fuente: Reproducido con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.

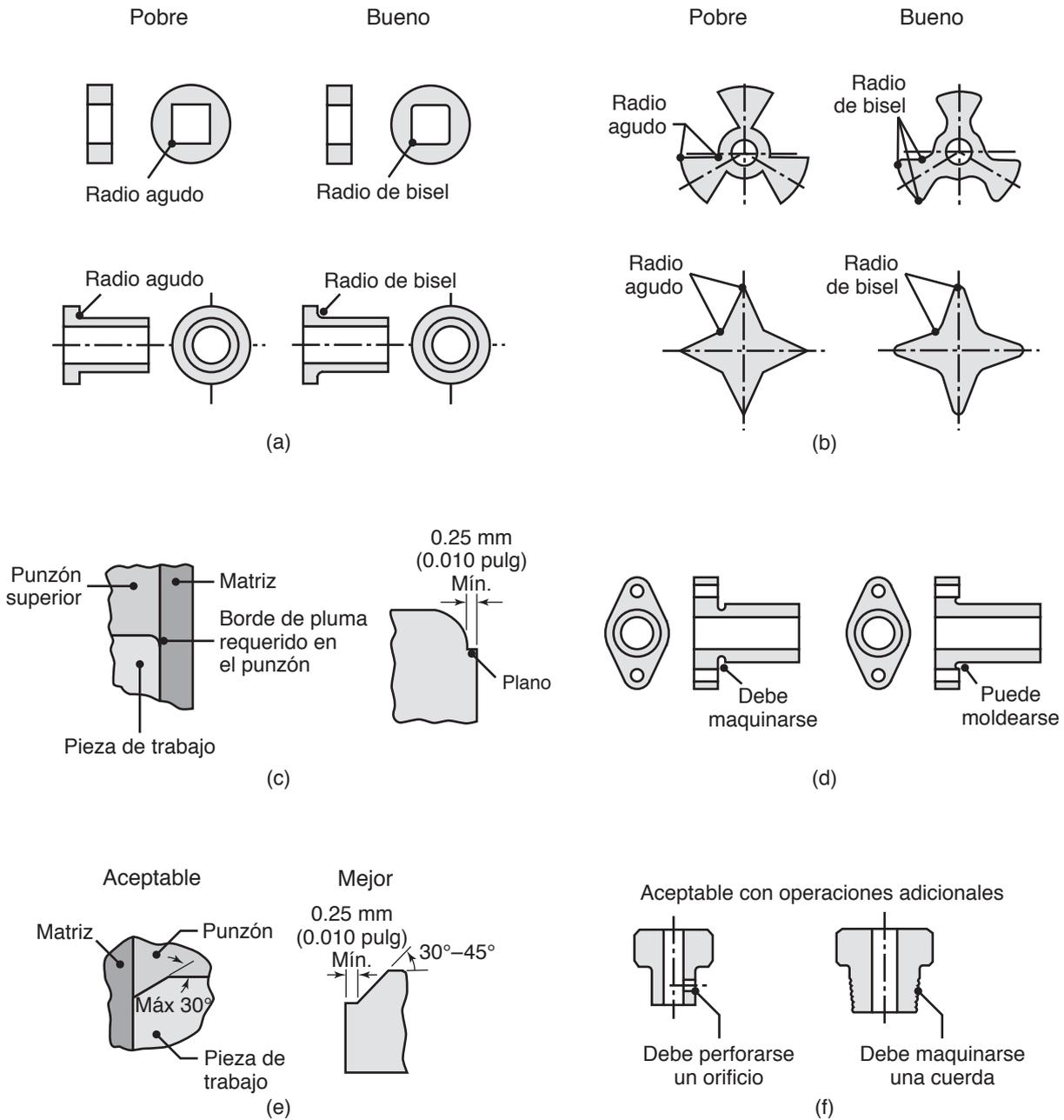


FIGURA 17.27 Ejemplos de piezas fabricadas por metalurgia de polvos que muestran diseños pobres y buenos; observe que deben evitarse los radios agudos y las esquinas de reentrada, también que las cuerdas y los orificios transversales deben producirse por separado mediante operaciones de maquinado adicionales. Fuente: Reimpreso con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.

1. La forma del comprimido debe ser lo más simple y uniforme posible. Se deben evitar cambios abruptos en el contorno, secciones delgadas, variaciones de espesor y altas proporciones de longitud a diámetro.
2. Deberán tomarse previsiones para efectuar la expulsión del comprimido en verde del molde sin dañar la pieza. Por lo tanto, orificios o muescas deben ser paralelos al eje de recorrido del punzón. También deben considerarse chaflanes para evitar daños a los bordes durante la expulsión de la pieza.

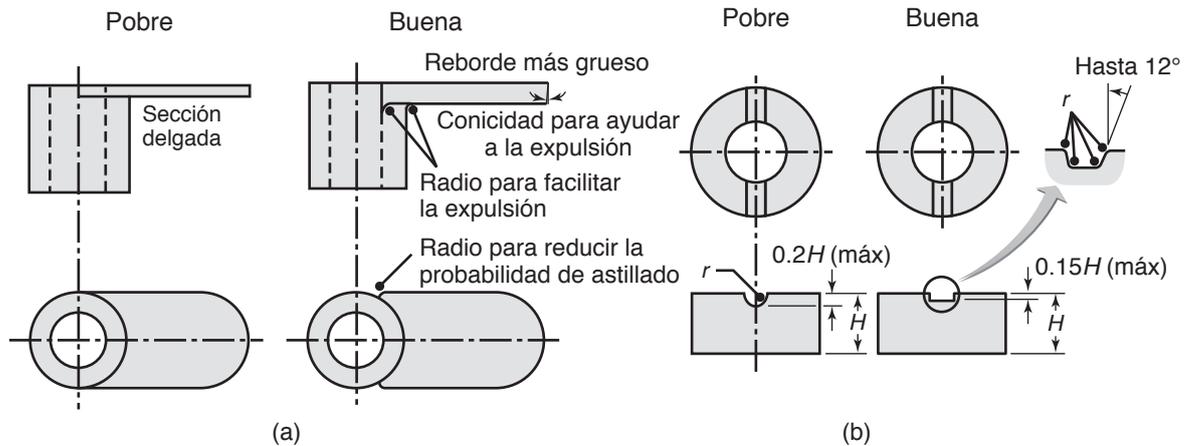


FIGURA 17.28 (a) Características de diseño para su uso con bridas sin soporte. (b) Características de diseño para el uso de ranuras. Fuente: Reimpreso con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.



Código QR 17.4 Ejemplos de diseños ganadores para piezas fabricadas por metalurgia de polvos. (Fuente: Cortesía de la Metal Powder Industries Federation).

3. Las piezas de PM deben realizarse con un rango amplio de las tolerancias dimensionales aceptables, de conformidad con sus aplicaciones previstas, con el fin de aumentar la vida de la herramienta y de la matriz, así como reducir los costos de producción.
4. Por lo general, las paredes de la pieza no deben ser inferiores a 1.5 mm (0.060 pulg) de espesor; sin embargo, es posible prensar exitosamente, con especial cuidado, paredes tan delgadas como 0.34 mm (0.0135 pulg) en componentes tan cortos como 1 mm (0.04 pulg). Las paredes con relaciones de longitud a espesor superiores a 8:1 son difíciles de prensar y las variaciones de densidad son prácticamente inevitables.
5. En las piezas, pueden producirse escalones si éstos son simples y su tamaño no es superior a 15% de la longitud general de la pieza. Es posible prensar escalones más grandes, pero requieren herramental de movimiento múltiple más complejo.
6. Se pueden prensar letras y números si se orientan perpendicularmente a la dirección de prensado y pueden ser realzados o rebajados. Las letras en relieve son más susceptibles de sufrir daños en la etapa en verde y también impiden el apilamiento durante el sinterizado.
7. Mediante un escalón en la matriz, es posible producir bridas o salientes. Sin embargo, las bridas largas pueden romperse durante la expulsión y, por lo tanto, pueden requerir herramental más elaborado. Una brida larga debe incorporar un ángulo de salida a su alrededor, un radio en el borde inferior y un radio en la unión de la brida con el cuerpo del componente para reducir las concentraciones de esfuerzos y, por consiguiente, la probabilidad de fractura.
8. En el borde de una pieza no puede pensarse un auténtico radio de curvatura porque esto requeriría que el punzón se ahusara suavemente (ligeramente ahusado) hasta un espesor de cero, como se muestra en la figura 17.27c. Para el prensado, se prefieren los chaflanes o planos, además un ángulo de 45° en un plano de 0.25 mm (0.010 pulg) es una práctica de diseño común.
9. Las cuñas, los cuñeros y orificios que se utilizan para la transmisión de pares en engranes y poleas pueden formarse durante la compactación del polvo. También pueden producirse salientes (vea la figura 10.14c), pero a condición de que se usen los ángulos de salida adecuados y que su longitud sea pequeña en comparación con la dimensión global del componente.
10. Se pueden hacer muescas y ranuras si están orientadas perpendicularmente hacia la dirección de prensado. Se recomienda que las ranuras circulares no excedan una profundidad de 20% del componente general y que las rectangulares no superen el 15 por ciento.
11. Las piezas producidas por moldeo por inyección de polvos tienen limitaciones de diseño semejantes a las de las piezas producidas mediante moldeo por inyección de polímeros (sección 19.3). Con el PIM, los espesores de pared deben ser unifor-

mes para minimizar la distorsión durante el sinterizado. Además, los moldes deben diseñarse con transiciones suaves para evitar la acumulación de polvo y permitir la distribución uniforme del polvo metálico.

12. Las tolerancias dimensionales de las piezas fabricadas por metalurgia de polvos y sinterizadas suelen ser del orden de ± 0.05 a 0.1 mm (± 0.002 a 0.004 pulg). Las tolerancias mejoran significativamente con las operaciones subsiguientes, como dimensionamiento, maquinado y rectificado.

17.7 Economía de la metalurgia de polvos

Debido a que la metalurgia de polvos puede producir piezas en forma neta o casi neta, eliminando de esta forma la fabricación de muchas operaciones secundarias y de ensamble, se ha vuelto cada vez más competitiva con la fundición, el forjado y el maquinado. Por otra parte, el alto costo inicial de los punzones, matrices y equipos para el procesamiento por PM implica que el volumen de producción debe ser lo suficientemente alto como para justificar este gasto. Aunque hay excepciones, el proceso suele ser económico para cantidades de más de 10 000 piezas.

Igual que en otras operaciones de metalurgia, el costo de las matrices y herramientas utilizadas en la PM depende de la complejidad de la pieza y del método de procesamiento de los polvos metálicos. Por lo tanto, los costos de las herramientas para procesos como el prensado isostático en caliente y el moldeo por inyección de metal son superiores a los de un procesamiento más convencional del polvo. Debido a que constituye un método de manufactura de forma casi neta, en la PM el costo de las operaciones de acabado es bajo en comparación con otros procesos. Sin embargo, cuando existan ciertas características en la pieza, como orificios roscados, muescas y cavidades y orificios transversales, los costos finales aumentarán. Por consiguiente, el seguimiento de las directrices de diseño en la PM para minimizar o evitar este tipo de operaciones adicionales puede ser más importante en este proceso que en otros.

Los costos del equipo que se utiliza en el procesamiento convencional por PM son semejantes a los del procesamiento por deformación volumétrica de metales, como el forjado. Sin embargo, el costo aumenta significativamente cuando se utilizan métodos como el HIP y PIM. Aunque el costo de los materiales se ha incrementado de manera significativa (vea la tabla 6.1), realmente ha mejorado la viabilidad económica de la PM porque los costos del herramental y equipo representan una fracción más pequeña del costo total de producción.

Los costos de mano de obra en la PM no son tan altos como los de otros procesos, sobre todo porque las operaciones individuales, como el mezclado, la compactación y el sinterizado de polvos, se realizan en equipos altamente automatizados, por lo que las habilidades requeridas no son muy altas.

La capacidad de la metalurgia de polvos para producir formas casi netas reduce significativamente o elimina los desechos. En la tabla 17.6 se muestra un comparativo de pesos entre componentes de aviones producidos por forjado y mediante procesos de PM. Observe que las piezas de PM se someten a otros procesos de maquinado, por lo que las piezas finales pesan menos que las realizadas mediante cualquiera de los dos procesos por separado.

TABLA 17.6

Pieza	Peso (kg)			
	Palanquilla forjada	Metalurgia de polvos	Pieza final	Ahorro en costos (%)
Refuerzo del fuselaje del F-14	2.8	1.1	0.8	50
Soporte de montaje para el motor del F-18	7.7	2.5	0.5	20
Soporte de sujeción del gancho de anclaje en aterrizajes en el F-18	79.4	25	12.9	25
Marco de góndola en el F-14	143	82	24.2	50

CASO DE ESTUDIO 17.3 Piezas elaboradas por metalurgia de polvos en un quitanieves

En la figura 17.29 se muestran algunas piezas del sistema de dirección de marcha libre incluido en un quitanieves comercial. Entre los 16 componentes fabricados por metalurgia de polvos, el piñón es el más grande, con alrededor de 140 mm (5.5 pulg) de diámetro.

El ensamble final incorpora un marco de acero estampado, cojinetes de bronce y plástico y un eje de acero forjado para producir una máquina altamente funcional y de bajo costo. En el diseño de estas piezas se incorporaron características únicas compatibles con la manufactura por PM para mejorar su funcionalidad.

Los componentes hechos mediante PM e incluidos en el ensamble van desde piezas de un solo nivel —con características fijas en las caras perforadas y varillas centrales— hasta piezas con varios niveles y geometrías complejas de la mtariz, varillas de núcleo y punzones de transferencia. Éstas son características únicas y se hacen en polvo con el fin de poseer control local de la densidad. Por ejemplo, el pestillo del embrague se produce con una geometría periférica de forma neta que no es ni práctica ni económica en comparación con otras tecnologías de manufactura. El material utilizado es acero FLC4608-70 (un polvo de hierro aleado previamente con 1.9% de Ni, 0.56% de Mo y 0.8% de C y mezclado con 2% de Cu), el cual tiene una resistencia a la tensión de 70 MPa y densidad de 6.8 g/cm^3 (0.23 lb/pulg^3).

Los números de pieza se prensan en la cara de los componentes como un simple medio de identificación. Dos de los componentes se hacen con tolerancias especialmente estrictas: el engrane del pestillo del embrague tiene una tolerancia en el diámetro de paso de 0.15 mm (0.006 pulg) con un corrimiento del ID

de 0.11 mm (0.0045 pulg) y 0.025 mm (0.001 pulg) de tolerancia en el orificio. El engrane de 32 dientes tiene una pared delgada de 57.75 mm (2.274 pulg) con tolerancia 0.05 mm (0.002 pulg) en el ID. Tanto el engrane que engancha al pestillo como el piñón adquieren una densidad de 6.7 g/cm^3 (0.21 lb/pulg^3) y resistencia a la tensión de 690 MPa (100 ksi).

Todos los componentes mostrados han pasado las pruebas de ciclo de vida normal y las pruebas de vida del producto, incluyendo cargas de choque al aplicar la tracción en reversa durante un viaje a máxima velocidad hacia adelante y sobre una pendiente. Los componentes del embrague, que también se sometieron a pruebas de resistencia a la corrosión por rocío salino y de funcionamiento adecuado a temperaturas bajo cero, no experimentaron fallas. En estas piezas no se requiere ninguna operación de maquinado porque son componentes suficientemente cercanos a la forma neta. Las únicas operaciones adicionales, antes del ensamble final, son el desbarbado por vibración y el rectificado del engrane de 32 dientes con el fin de producir orificios y acabados superficiales con tolerancia estricta. Los pestillos de embrague, producidos con acero sinterizado endurecido, se enfrían en una atmósfera tal que la porosidad presente pueda llenarse con un lubricante para proporcionar lubricidad en la interfase de las piezas acopladas (vea también la sección 33.6).

Fuente: Reproducido con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.

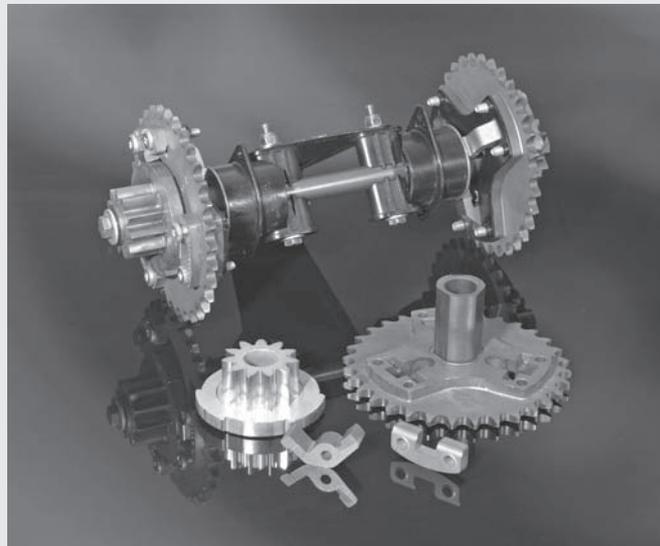


FIGURA 17.29 Piezas fabricadas por metalurgia de polvos y utilizadas en un quitanieves comercial.

RESUMEN

- La metalurgia de polvos es un proceso para dar forma neta a la pieza con una geometría y acabado final que consiste en la producción, mezclado, compactación en matrices y sinterizado de metales en polvo con el fin de impartirles resistencia, dureza y tenacidad. Aunque el tamaño y el peso de los productos de la metalurgia de polvos son limitados, el proceso es capaz de producir piezas relativamente complejas a buen precio, en forma neta o final, con tolerancias dimensionales estrictas y a partir de una amplia variedad de polvos metálicos y aleados.
- En las piezas fabricadas por PM, se pueden realizar operaciones secundarias y de acabado para mejorar su precisión dimensional, el acabado superficial, las propiedades mecánicas y físicas y la apariencia. Estas operaciones incluyen forjado, tratamiento térmico, maquinado, rectificado, recubrimiento, impregnación (por ejemplo con aceite) e infiltración (como en los metales con bajo punto de fusión).
- El control de la forma y la calidad del polvo, las variables del proceso y las atmósferas de sinterizado son consideraciones importantes en la calidad del producto. La densidad y las propiedades mecánicas y físicas pueden controlarse mediante el diseño de las herramientas y el ajuste de la presión de compactación.
- Un proceso de PM importante es el moldeo por inyección de polvos, el cual implica la mezcla de polvos metálicos muy finos con un polímero para hacer que los polvos fluyan más fácilmente en los moldes o matrices de forma compleja.
- Las consideraciones de diseño para la PM incluyen la forma de la pieza, la capacidad para expulsar el comprimido en verde de la matriz y las tolerancias dimensionales que son aceptables para cada aplicación particular.
- El proceso de la metalurgia de polvos es adecuado para corridas de producción de volumen medio y alto y para piezas relativamente pequeñas. Tiene algunas ventajas competitivas frente a otros métodos de producción como la fundición, el forjado y el maquinado.

TÉRMINOS CLAVE

Aleación mecánica	Cribado	Mezclado	Prensado isostático en frío
Atomización	Deposición electrolítica	Moldeo por inyección	Reducción
Carbonilos	Difusión	Moldeo por inyección de metal	Resistencia en verde
Compactación	Factor de forma	Moldeo por inyección de polvos	Sinterizado
Compactación sin presión	Impregnación	Prensado	Sinterizado por chispa
Comprimido o compactado en verde (crudo)	Infiltración	Prensado isostático en caliente	Trituración
	Metalurgia de polvos		

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, T., *Powder Sampling and Particle Size Determination*, Elsevier, 2003.
- ASM *Handbook*, Vol. 7: *Powder Metal Technologies and Applications*, ASM International, 1998.
- Atkinson, H. V. y Rickinson, B. A., *Hot Isostatic Pressing*, Adam Hilger, 1991.
- Douvard, D. (ed.), *Powder Metallurgy*, ISTE Publishing, 2009.
- Fayed, M. y Otten, L. (eds.), *Handbook of Powder Science and Technology*, 2a. ed., Chapman & Hall, 1997.
- German, R. M., *A-Z of Powder Metallurgy*, Elsevier, 2007.
- German, R. M., *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*, Metal Powder Industry, 2006.
- Kang, S.-J., *Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure*, Butterworth-Heinemann, 2005.
- Klar, E. y Samal, P. K., *Powder Metallurgy Stainless Steels: Processing, Microstructures and Properties*, ASM International, 2008.
- Leander, F. y West, W. G., *Fundamentals of Powder Metallurgy*, Metal Powder Industries Federation, 2002.

Mohan, T. R. R. y Ramakrishnan, P. (eds.), *Powder Metallurgy in Automotive Applications-II*, Science Publishers, 2002.

Neikov, O. D., Naboychenko, S., Moura Chova, I. B. y Gopienko, (eds.), *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders: Technologies and Applications*, Elsevier, 2009.

Powder Metallurgy Design Manual, 2a. ed., Metal Powder Industries Federation, 1995.

Selesca, S. M., Selesca, M. y Danninger, S., *Machinability of Powder Metallurgy Steels*, Cambridge International Science, 2005.

Upadhyaya, A. y Upadhyaya, G. S., *Powder Metallurgy: Science, Materials, and Technology*, Universities Press, 2011.

Upadhyaya, G. S., *Sintered Metallic and Ceramic Materials: Preparation, Properties and Applications*, Wiley, 2000.

PREGUNTAS DE REPASO

17.1 Describa brevemente los pasos de producción que intervienen en la fabricación de piezas por metalurgia de polvos.

17.2 Mencione los diversos métodos de producción de polvos y explique los tipos de polvos producidos.

17.3 Explique por qué pueden mezclarse los polvos metálicos.

17.4 Describa los métodos utilizados en la compactación de polvo metálico.

17.5 ¿Qué es el prensado isostático? ¿En qué se distingue del prensado pseudoisostático?

17.6 ¿Qué riesgos están involucrados en el procesamiento por metalurgia de polvos? Explique sus causas.

17.7 Describa lo que le ocurre a los polvos metálicos durante el sinterizado.

17.8 Describa las técnicas de bolsa seca y bolsa húmeda.

17.9 ¿Por qué pueden realizarse operaciones secundarias y de acabado en las piezas fabricadas por metalurgia de polvos?

17.10 Explique la diferencia entre impregnación e infiltración. Mencione algunas aplicaciones de cada una de estas técnicas.

17.11 ¿Qué es la densificación con rodillo? ¿Por qué se hace?

17.12 ¿Qué es la aleación mecánica? ¿Cuáles son sus ventajas con respecto a la aleación convencional de metales?

17.13 ¿Qué es el proceso Osprey?

17.14 ¿Qué es el cribado de metales en polvo? ¿Por qué se hace?

17.15 ¿Por qué se necesitan atmósferas protectoras en el sinterizado? ¿Cuáles serían los efectos sobre las propiedades de las piezas hechas por metalurgia de polvos si no se usaran tales atmósferas?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

17.16 ¿Por qué hay variación de densidad en la compactación de polvos? ¿Cómo se reduce?

17.17 ¿Cuál es la magnitud de los esfuerzos y fuerzas que intervienen en la compactación de polvos?

17.18 Liste las semejanzas y diferencias entre el forjado y la compactación de polvos metálicos.

17.19 Mencione algunas razones por las que el moldeo por inyección de polvos es un proceso importante.

17.20 ¿En qué se diferencia el equipo utilizado para la compactación de polvos del empleado en otras operaciones metalúrgicas estudiadas en capítulos anteriores?

17.21 Explique por qué las propiedades mecánicas y físicas de las piezas hechas por metalurgia de polvos dependen de su densidad.

17.22 ¿Cuáles son los efectos de los diferentes tamaños y formas de las partículas de metal en el procesamiento por metalurgia de polvos?

17.23 Describa las ventajas y limitaciones relativas del prensado isostático en frío y en caliente.

17.24 En caso de existir, en la metalurgia de polvos, ¿cuál es la diferencia en los requisitos establecidos para el material del punzón y del molde o matriz con respecto a los de las operaciones de forjado y extrusión? Explique su respuesta.

17.25 El proceso de metalurgia de polvos puede ser competitivo con procesos como la fundición y el forjado. Explique por qué.

17.26 ¿Cuáles son las razones para las formas de las curvas que se muestran en la figura 17.11 y para sus posiciones relativas en los diagramas?

17.27 ¿Los comprimidos en verde o crudos deben llevarse hasta la temperatura de sinterizado en forma lenta o rápida? Explique su razonamiento.

17.28 Debido a que se someten a un procesamiento especial, los polvos metálicos son más caros que los propios metales a granel, especialmente los polvos que se emplean en el moldeo por inyección de polvo. ¿Cómo se justifica el costo adicional en el procesamiento de piezas por metalurgia de polvos?

17.29 En la figura 17.12 puede observarse que la presión no es uniforme en todo el diámetro del comprimido a una distancia particular del punzón. ¿Cuál es la razón de esta variación?

17.30 ¿Por qué la presión de compactación y la temperatura de sinterizado dependen del tipo de polvo metálico?

17.31 ¿Qué es más resistente: una mezcla de acero inoxidable y cobre en polvo que se compacta y sinteriza o un polvo de acero inoxidable que se compacta, sinteriza e infiltra con cobre? Explique su respuesta.

17.32 Mencione los diversos métodos de producción de polvos y bosqueje la morfología de los polvos producidos.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

17.33 Estime el tonelaje máximo requerido para compactar una masa de latón de 3.0 pulg de diámetro. ¿La altura del lingote marca alguna diferencia en su respuesta? Explique su razonamiento.

17.34 Consulte la figura 17.11a. ¿Cuál debe ser el volumen de polvo de hierro fino y suelto para hacer un comprimido sólido y cilíndrico de 25 mm de diámetro y 20 mm de altura?

17.35 Determine los factores de forma para (a) un cilindro con una relación dimensional de 1:1:1 y (b) una hojuela con una proporción de 1:12:12.

17.36 Estime el número de partículas que hay en una muestra de 500 g de polvo de hierro si el tamaño de las partículas es de 50 micras.

17.37 Suponga que la superficie de una partícula de cobre está cubierta por una capa de óxido de 0.1 mm de espesor. ¿Cuál es el volumen (y el porcentaje del volumen total) ocupado por esta capa si la propia partícula de cobre tiene 75 μm de diámetro?

17.38 Un polvo grueso de cobre se compacta en una prensa mecánica a una presión de 20 ton/pulg². Durante el sinterizado, la pieza en verde o cruda se reduce 8% más. ¿Cuál es la densidad final?

17.39 Se va a fabricar un engrane a partir de polvos de hierro. Se desea que tenga una densidad final del 90% de la densidad del hierro fundido y se sabe que la contracción en el sinterizado será de aproximadamente 5%. Para un engrane con diámetro de 2.5 pulg y centro de 0.75 pulg, ¿cuál es la fuerza de presión requerida?

17.40 ¿Qué volumen de polvo se necesita para hacer el engrane del problema 11.39?

17.41 La pieza axisimétrica que se muestra en la figura P17.41 se va a producir a partir de polvo fino de cobre y tendrá una resistencia a la tensión de 175 GPa. Determine la presión de compactación y el volumen inicial de polvo que se requieren.

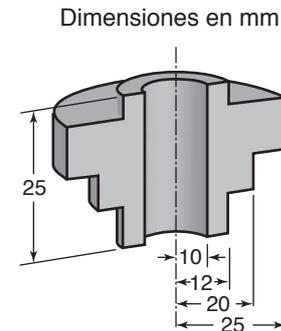


FIGURA P17.41

17.42 Suponga que usted es un profesor que cubre los temas descritos en este capítulo y que aplicará un examen de los aspectos numéricos para probar la comprensión de sus estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

17.43 Prepare una ilustración similar a la figura 13.1 que muestre la variedad de opciones de manufactura por metalurgia de polvos.

17.44 Haga bosquejos de productos hechos por metalurgia de polvos en los que las variaciones de densidad (vea la figura 17.12) serían deseables. Explique el por qué en términos de las funciones de esas piezas.

17.45 Compare las consideraciones de diseño para los productos generados por metalurgia de polvos con las de (a) la fundición y (b) el forjado. Describa sus observaciones.

17.46 ¿Existen aplicaciones en las que, como ingeniero de manufactura, usted no recomendaría un producto fabricado por metalurgia de polvos? Explique su respuesta.

17.47 Describa otros métodos de manufactura para las piezas que se muestran en la figura 17.1.

17.48 Usando Internet, localice proveedores de polvos metálicos y compare el costo del polvo con el costo de los lingotes para cinco materiales diferentes.

17.49 Explique por qué las piezas de metal en polvo se utilizan comúnmente para elementos de máquina que requieren buenas características de fricción y desgaste y para las piezas producidas en masa.

17.50 Se dijo que el moldeo por inyección de polvo compite bien con las fundiciones por revestimiento y con las piezas pequeñas forjadas en diferentes materiales, pero no con las fundiciones en dado de zinc y aluminio. Explique por qué.

17.51 Describa cómo podría ser útil la información dada en la figura 17.15 para el diseño de piezas por metalurgia de polvos.

17.52 En el proceso mostrado en la figura 17.21, se indicó que las formas producidas se limitan a partes con simetría axial. ¿Cree usted que también sería posible producir otras formas? Describa cómo puede modificarse el diseño de la preparación para producir otras formas y explique las dificultades que pueden encontrarse.

17.53 Se ha observado que los engranes fabricados con metalurgia de polvos son muy comunes en equipos de oficina de bajo costo, como el mecanismo de arrastre del papel en las impresoras de inyección de tinta. Revise los requisitos de diseño de esos engranes y liste las ventajas que les confieren los métodos de manufactura de la metalurgia de polvos.

17.54 Las piezas con simetría axial que se muestran en la figura P17.54 deben producirse mediante metalurgia de polvos. Describa los cambios que usted recomendaría en el diseño.

17.55 Suponga que usted trabaja en ventas técnicas. ¿Qué aplicaciones que actualmente utilizan piezas fabricadas mediante

procesos distintos a la metalurgia de polvos trataría de desarrollar? ¿Qué le diría a sus clientes potenciales durante sus visitas de venta? ¿Qué tipo de preguntas cree que le harían ellos?

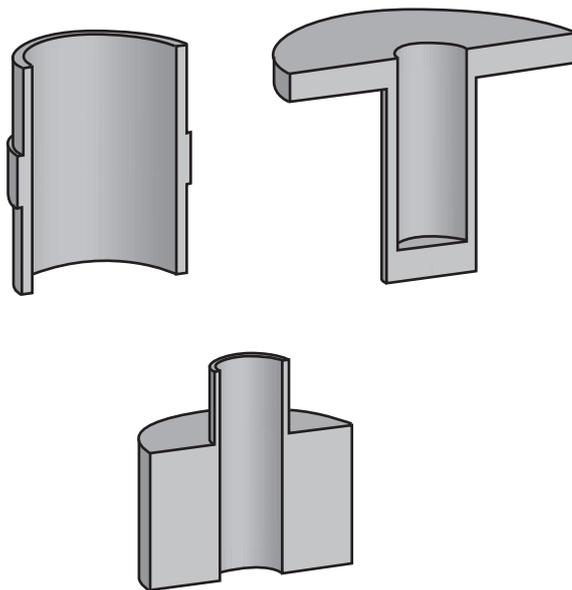


FIGURA P17.54

Cerámicos, vidrios y superconductores: procesamiento y equipo

CAPÍTULO

18

- En este capítulo se presentan los procesos de manufactura asociados con los cerámicos, vidrios y superconductores.
- En primer lugar se describe la preparación de polvos cerámicos, seguida por las operaciones que producen piezas discretas mediante los procesos básicos de colado o vaciado, prensado, extrusión y moldeo.
- También se analizan el secado y la cocción, seguidos de las operaciones de acabado en los cerámicos.
- La manufactura del vidrio involucra la producción de formas continuas, como placas, tubos y barras, mediante estirado, laminado o métodos de flotación; por lo general, las operaciones para elaborar productos discretos implican moldeo, soplado o prensado.
- El capítulo termina con el procesamiento de superconductores, los cuales se producen principalmente con el proceso de polvo de óxido en tubo.

Productos típicos que se fabrican: Cerámicos: aislantes eléctricos, rotores para turbinas de gas, componentes ligeros para máquinas de alta velocidad, cojinetes de bolas y rodillos, sellos, componentes para hornos, aditamentos para hornos y revestimientos. Vidrio: cristalería, vidrio laminado, vidrio a prueba de balas, focos, lentes, botellas, fibras de vidrio, barras y tubos. Superconductores: imanes para captación de imágenes por resonancia magnética (MRI, por sus siglas en inglés).

Procesos alternativos: colado, forjado, moldeo por inyección de polvos, moldeo por soplado y prototipado rápido.

- 18.1 **Introducción** 475
- 18.2 **Moldeo de cerámicos** 476
- 18.3 **Formado y moldeo del vidrio** 483
- 18.4 **Técnicas para reforzar y tratar térmicamente al vidrio** 486
- 18.5 **Consideraciones de diseño para cerámicos y vidrios** 489
- 18.6 **Procesamiento de superconductores** 489

EJEMPLO:

- 18.1 **Cambios dimensionales durante el moldeo de componentes cerámicos** 482

CASO DE ESTUDIO:

- 18.1 **Producción de cintas superconductoras para altas temperaturas** 490

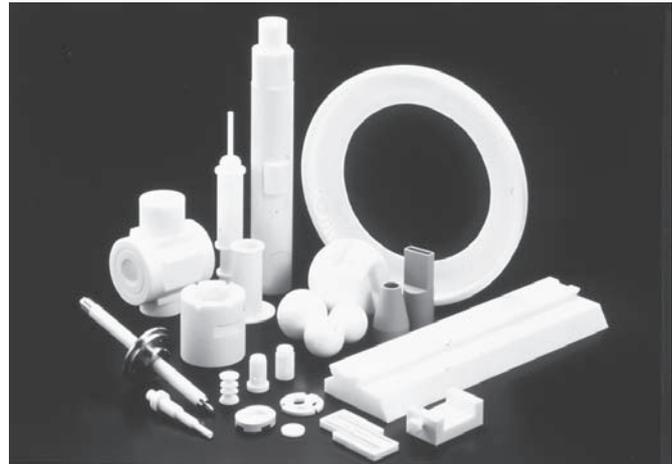
18.1 Introducción

Las propiedades y aplicaciones de los cerámicos y los vidrios se describen en el capítulo 8. Estos materiales tienen características importantes, como resistencia a las altas temperaturas y dureza, baja conductividad eléctrica y térmica, inertidad química y resistencia al desgaste y a la corrosión. El amplio rango de aplicaciones de estos materiales (figura 18.1) incluye piezas como aislantes eléctricos, bujías, cojinetes de bolas, baldosines y platos.

Los métodos de procesamiento empleados para los cerámicos se componen de (a) trituration de las materias primas, (b) su moldeo por diversos medios, (c) secado y cocción y (d) operaciones de acabado, según sean necesarias, para impartir las tolerancias dimensionales y el acabado superficial requeridos. Para los vidrios, los procesos implican (a) mezclar y fundir las materias primas en un horno y (b) su moldeo o el generar la forma mediante moldes utilizando diversas técnicas, dependiendo de la forma y el



(a)



(b)

FIGURA 18.1 Ejemplos de (a) piezas de vidrio y (b) piezas de cerámica. *Fuente:* (a) Cortesía de Commercial Optical Manufacturing, Inc. (b) Cortesía de Kyocera.

tamaño de la pieza. Se pueden producir productos discretos, como botellas, y productos continuos, como vidrio plano, barras, tubos y fibras. Los vidrios pueden fortalecerse por medios térmicos o químicos y mediante su laminación con hojas de polímero, como se hace con los parabrisas y los vidrios a prueba de balas.

18.2 Moldeado de cerámicos

Existen diversas técnicas disponibles para el procesamiento de cerámicos en productos útiles (tabla 18.1), en función del tipo de cerámicos involucrados y de sus formas moldeadas. Por lo general, la producción de algunas piezas de cerámicos, como alfarería,

TABLA 18.1

Características generales de procesamiento de cerámicos

Proceso	Ventajas	Limitaciones
Moldeo de barbotina	Piezas grandes, formas complejas, bajo costo de equipo.	Tasa de producción baja, precisión dimensional limitada.
Extrusión	Formas huecas y diámetros pequeños, alta tasa de producción.	Piezas con sección transversal constante, espesor limitado.
Prensado en seco	Tolerancias estrechas, altas tasas de producción (con automatización).	Variación de la densidad en piezas con altas relaciones de longitud a diámetro, los troqueles requieren resistencia a la abrasión y al desgaste, el equipo puede ser costoso.
Prensado en húmedo	Formas complejas, alta tasa de producción.	Tamaño de pieza y precisión dimensional limitados, los costos de las herramientas pueden ser altos.
Prensado en caliente	Piezas resistentes, de alta densidad.	Requiere atmósferas protectoras, la vida de las matrices puede ser corta.
Prensado isostático	Distribución uniforme de la densidad.	El equipo puede ser costoso.
Torneado para cerámicos	Tasa de producción alta con automatización, bajo costo de las herramientas.	Limitado a partes axisimétricas, precisión dimensional limitada.
Moldeo por inyección	Formas complejas, alta tasa de producción.	Las herramientas pueden ser costosas.

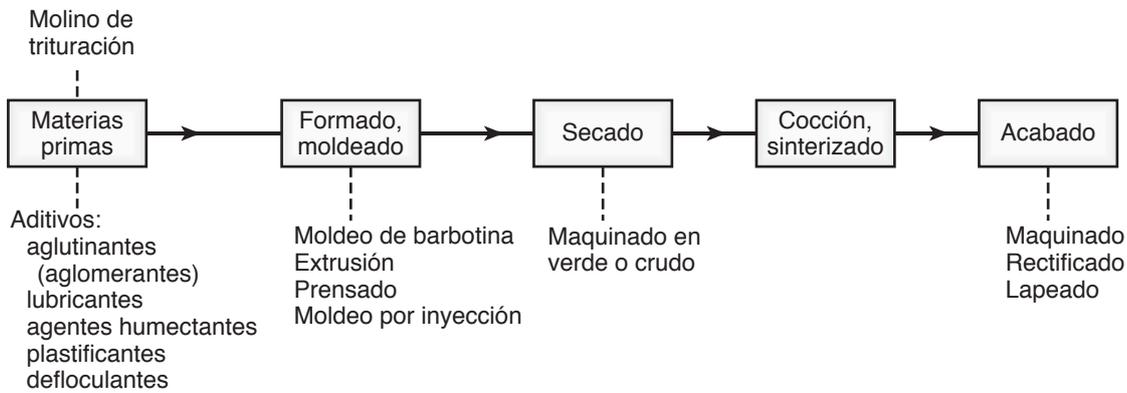


FIGURA 18.2 Etapas de procesamiento involucradas en la fabricación de piezas con materiales cerámicos.

recipientes para horno o azulejos (baldosines), no implica el mismo nivel de control de los materiales y procesos que las piezas de alta tecnología hechas a partir de cerámicos estructurales como el nitruro de silicio y carburo de silicio, así como las herramientas de corte hechas, por ejemplo, a partir de óxido de aluminio. En todo caso, el procedimiento es similar y consiste en los siguientes pasos (figura 18.2):

1. Trituración o molienda de las materias primas en partículas muy finas.
2. Mezcla del material con aditivos para impartir ciertas características deseables.
3. Moldeado, secado y cocción del material.

El primer paso en el procesamiento de cerámicos es el *triturado*, también llamado *pulverización* o *molienda*, de las materias primas. El triturado se realiza generalmente en un *molino de bolas* (vea la figura 17.6b), ya sea en seco o en húmedo. El triturado en húmedo es más eficaz porque mantiene juntas a las partículas y evita que las partículas finas contaminen el entorno. Después, las partículas pueden dimensionarse haciéndolas pasar a través de un tamiz para después filtrarlas y lavarlas.

Posteriormente las partículas molidas se mezclan con *aditivos*, los cuales pueden ser uno o más de los siguientes:

- **Aglutinante**, para mantener unidas las partículas cerámicas.
- **Lubricante**, para reducir la fricción interna entre las partículas durante el moldeo y ayudar a retirar la pieza del molde.
- **Agente humectante**, para mejorar el mezclado.
- **Plastificante**, para que la mezcla sea más plástica y fácil de moldear.
- **Agentes**, para controlar la formación de espuma y el sinterizado.
- **Defloculante**, para hacer más uniforme la suspensión del cerámico en agua mediante el cambio de las cargas eléctricas presentes en las partículas de arcilla, de manera que las partículas se repelan en lugar de atraerse entre sí; el agua se añade para que la mezcla sea más vertible y por lo tanto menos viscosa; los defloculantes típicos son Na_2CO_3 y Na_2SiO_3 en cantidades menores al uno por ciento.

Los tres procesos básicos de moldeo para los cerámicos son el colado o vaciado, el formado plástico y el prensado. Las piezas fabricadas también pueden someterse a procesamiento adicional, como maquinado y rectificado, para un mejor control de sus dimensiones y del acabado superficial.

18.2.1 Vaciado

El proceso de vaciado más común es el **moldeo** o **vaciado de barbotina**, también llamado **vaciado de drenado**, como se ilustra en la figura 18.3. Una barbotina es una suspensión de partículas de material cerámico en un líquido inmiscible, generalmente agua. La

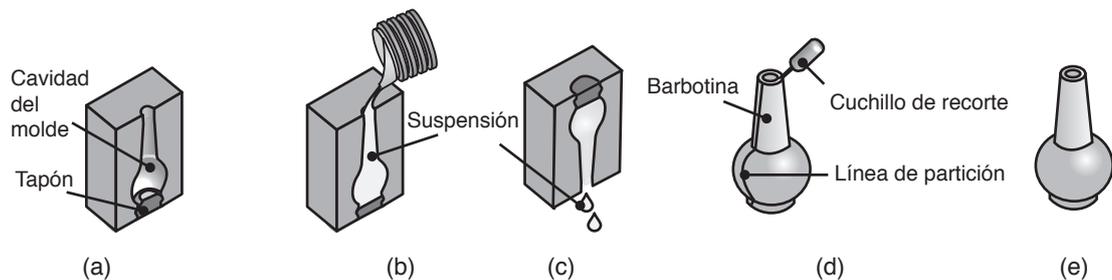


FIGURA 18.3 Secuencia de operaciones en el vaciado de barbotina para una pieza cerámica. (a) El molde se ensambla y se agrega el tapón; algunos tapones incorporan componentes de drenado; (b) la suspensión, una mezcla de partículas de material cerámico, aglutinantes y agua, se vierte en el molde; (c) el molde se invierte y la suspensión se vierte desde éste, dejando una capa fina sobre su cavidad; (d) después de un periodo de secado inicial, la barbotina se retira del molde y se eliminan características como las líneas de partición y el labiado del bebedero; (e) la barbotina está lista para ser secada y cocida en un horno para que adquiera la resistencia y la dureza necesarias.

barbotina se vierte en un molde poroso, normalmente hecho de yeso de París (también conocido como yeso mate), y puede constar de diversos componentes, como sucede en otros procesos de moldeado.

La barbotina debe tener suficiente fluidez y baja viscosidad para que fluya fácilmente en el molde; en gran parte, esto es igual a la importancia que tiene la fluidez de los metales fundidos en las operaciones de fundición que se describieron en la sección 10.3. El vaciado de la barbotina debe hacerse adecuadamente para evitar que quede aire atrapado, lo cual puede ser un problema significativo durante el vaciado.

Después de que el molde ha absorbido una parte del agua desde las capas externas de la suspensión, se invierte y la suspensión restante se desecha. El producto es un objeto hueco, tal como en la fundición hueca por escurrimiento con metales descrita en la sección 11.4.3. La parte superior de la pieza se recorta (observe el cuchillo de recorte en la figura 18.3d), el molde se abre y se retira la pieza.

Mediante el vaciado de barbotina es posible hacer piezas grandes y complejas, como utensilios de plomería u objetos de arte. Aunque los costos de los moldes y el equipo son bajos, el control dimensional es deficiente y la tasa de producción es baja. En algunas aplicaciones, ciertos componentes del producto —como las asas para tazas y jarras— se hacen por separado y luego se unen a la pieza usando la barbotina como adhesivo. Los moldes también pueden constar de varios componentes.

Para las piezas de materiales cerámicos sólidos, la barbotina se suministra continuamente en el molde para reponer el agua absorbida, de lo contrario la pieza se encogerá. En esta etapa, la pieza se describe como un sólido blando o semirrígido. Cuanto mayor sea la concentración de sólidos en la barbotina, menor será la cantidad de agua que debe eliminarse. La pieza extraída del molde se conoce como una *pieza en verde* o cruda, igual que en la metalurgia de polvos.

Mientras las partes todavía están en verde o crudas, pueden maquinarse para producir ciertas características o darles mejor precisión dimensional. Sin embargo, debido a la naturaleza delicada de los comprimidos en verde, el maquinado suele realizarse manualmente con herramientas simples. Por ejemplo, las rebabas de un moldeado de barbotina pueden retirarse suavemente con un cepillo de cerdas de alambre fino, o los orificios pueden taladrarse en el molde.

Cuchilla de doctor y otros procesos. Mediante el *proceso cuchilla de doctor* (figura 18.4) y a partir de materiales cerámicos, pueden hacerse hojas delgadas con espesores menores a 1.5 mm (0.06 pulg). La barbotina se moldea sobre una cinta plástica en movimiento, mientras que su espesor se controla mediante una cuchilla. Las hojas de cerámicos también pueden producirse por métodos como (a) *laminar* la barbotina entre pares de rodillos y (b) *colar* la barbotina sobre una cinta de papel, que posteriormente termina de secarse durante el proceso de cocción.

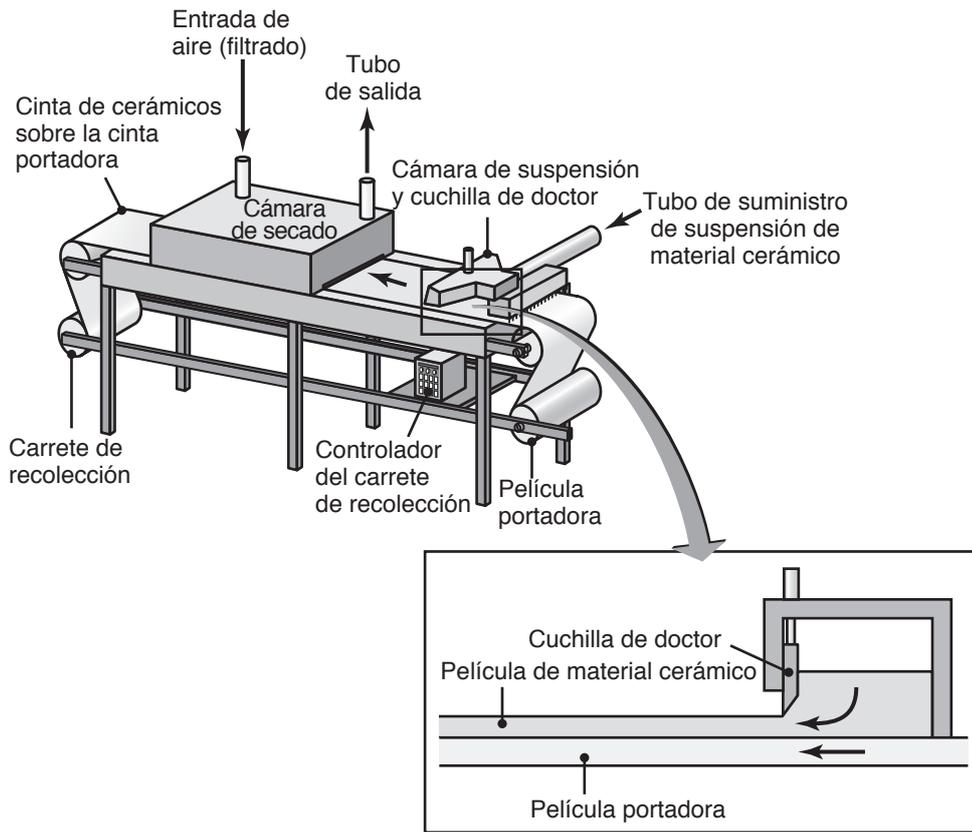


FIGURA 18.4 Producción de hojas cerámicas mediante el proceso cuchilla de doctor.

18.2.2 Formado plástico

El *formado plástico*, también llamado *formado blando*, *húmedo* o *hidroplástico*, puede realizarse mediante diversos métodos, como la extrusión, el moldeo por inyección, el moldeo y por *torneado* (figura 18.5). El formado plástico tiende a orientar la estructura en capas de arcilla a lo largo de la dirección del flujo de material y, en consecuencia,

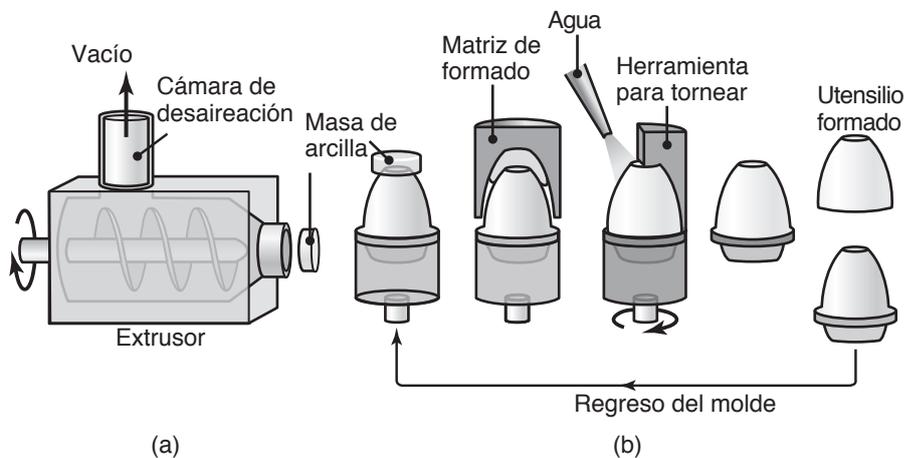


FIGURA 18.5 Operaciones de (a) extrusión y (b) torneado. Fuente: Según R. F. Stoops.

tiende a causar un comportamiento anisotrópico del material, tanto en el procesamiento posterior como en las propiedades finales del producto cerámico.

En la *extrusión*, la mezcla de arcilla (que contiene entre 20 y 30% de agua) se fuerza a través de una abertura de la matriz mediante un equipo tipo tornillo extrusor (vea, por ejemplo, la figura 19.2). En este proceso, la sección transversal del producto extruido es constante y hay limitaciones al espesor de pared para las piezas extruidas huecas, ya que la pared puede fracturarse durante la cocción (sección 18.2.4). Los productos pueden someterse a operaciones de moldeo adicionales. Los costos de la herramienta son bajos y las tasas de producción son altas.

18.2.3 Prensado

Prensado en seco. Ésta es una técnica similar a la compactación de polvos metálicos que se describe en la sección 17.3. El *prensado en seco* se utiliza para obtener formas relativamente simples, como lozas, refractarios para hornos y productos abrasivos. El contenido de humedad de la mezcla es generalmente menor al 4%, pero puede ser de hasta 12%. Por lo general, a la mezcla se le agregan aglutinantes o aglomerantes orgánicos e inorgánicos (como ácido esteárico, cera, almidón y alcohol de polivinilo); estos aditivos dan fuerza y también actúan como lubricantes para ayudar a la compactación. El prensado en seco tiene las mismas altas tasas de producción y el mismo control de la precisión dimensional que la metalurgia de polvos.

La presión del prensado se encuentra entre 35 y 200 MPa (5 y 30 ksi). La densidad puede variar de manera significativa en los cerámicos prensados en seco, como en la compactación de la metalurgia de polvos (vea la figura 17.12), debido a la fricción entre las partículas y las paredes del molde. Las variaciones de densidad causan deformación o alabeo durante la cocción, lo que es particularmente grave para las piezas que tienen altas relaciones de longitud a diámetro; la relación máxima recomendada es de 2:1. Es posible usar diversos métodos para minimizar las variaciones de densidad, incluyendo (a) un diseño adecuado de herramientas, (b) el prensado vibratorio y el formado de impacto, particularmente para elementos combustibles de los reactores nucleares, y (c) el prensado isostático. Las prensas modernas empleadas para el prensado en seco están altamente automatizadas. Las matrices, por lo general fabricadas a partir de carburos o de acero endurecido, deben tener una alta resistencia al desgaste con el fin de resistir la abrasión provocada por las partículas abrasivas del material cerámico.

Prensado en húmedo. En el *prensado en húmedo*, la pieza se forma en un molde mientras se encuentra bajo alta presión en una prensa hidráulica o mecánica. Por lo general, el contenido de humedad oscila entre 10 y 15%. Las tasas de producción son altas; sin embargo, (a) el tamaño de la pieza está limitado, (b) es difícil conseguir control dimensional debido a la contracción durante el secado y (c) los costos de herramienta pueden ser altos. El prensado en húmedo se utiliza generalmente para la fabricación de piezas con formas complicadas, como filtros y empaques electrónicos.

Prensado isostático. Este proceso se utiliza para los cerámicos con el fin de obtener una distribución de densidad uniforme en toda la pieza durante la compactación (vea la sección 17.3.2). Por ejemplo, los aislantes para bujías automotrices se hacen mediante este método a temperatura ambiente. Los álabes de nitruro de silicio para aplicaciones de alta temperatura (vea la figura 8.1) se hacen por *prensado isostático en caliente*.

Torneado. Los platos cerámicos se hacen mediante una serie de pasos (figura 18.5). Primero, las masas de arcilla son extruidas y moldeadas en forma de una loza delgada sobre un molde de yeso; después se tornean sobre un molde giratorio. El *torneado* es un movimiento en el que la losa de arcilla se moldea o se le da forma por medio de plantillas o rodillos. A continuación, la pieza se seca y se cuece. El proceso de torneado se limita a piezas axisimétricas o de simetría axial y tiene una precisión dimensional limitada.

Moldeo por inyección. El *moldeo por inyección* se utiliza ampliamente para el formado de cerámicos de precisión en aplicaciones de alta tecnología, como componentes de motores para cohetes. La materia prima se mezcla con un aglutinante, por ejemplo un po-

límero termoplástico (polipropileno, polietileno de baja densidad o acetato de vinil-etileno) o cera, y se moldea por inyección. Por lo general, el aglomerante se elimina mediante pirólisis (inducción de cambios químicos por calor) y la pieza es cocida.

El proceso de moldeo por inyección puede producir secciones delgadas, con espesores comúnmente menores a 10 o 15 mm (0.4 o 0.6 pulg), para la mayoría de los cerámicos empleados en ingeniería, como la alúmina, zirconia, el nitruro de silicio, carburo de silicio y sialón (vea el capítulo 8). Las secciones más gruesas requieren un control cuidadoso de los materiales utilizados y de los parámetros de procesamiento con el fin de evitar defectos como grietas y huecos internos.

Prensado en caliente. En este proceso, también llamado *sinterizado a presión*, se aplican simultáneamente presión y calor para reducir la porosidad en la pieza, por lo que se vuelve más densa y más resistente. El grafito se usa comúnmente como material para punzones y matrices y, durante el prensado, generalmente se emplean atmósferas protectoras.

También se puede utilizar *prensado isostático en caliente* (HIP, por sus siglas en inglés), sobre todo, para mejorar la precisión de la forma y la calidad de los cerámicos de alta tecnología, como el carburo de silicio y el nitruro de silicio. Se ha demostrado que el procesamiento por prensado isostático en caliente encapsulado en vidrio es eficaz para este propósito.

18.2.4 Secado y cocción

El siguiente paso en el procesamiento de los cerámicos consiste en el secado y cocido de la pieza para darle la resistencia y dureza adecuadas. El *secado* es una etapa crítica debido a la tendencia de la pieza a deformarse o romperse por las variaciones en su contenido de humedad y en su espesor. El control de la humedad atmosférica y la temperatura ambiente es importante para reducir la deformación o el alabeo y el agrietamiento.

La pérdida de humedad durante el secado causa la contracción de la pieza hasta en 20% del tamaño original húmedo (figura 18.6). En un ambiente húmedo, la tasa de evaporación es baja y, por lo tanto, el gradiente de humedad a través del espesor de la pieza es menor que en un ambiente seco. El gradiente de humedad bajo impide un gradiente grande —desigual en la contracción que ocurre a partir de la superficie hacia el interior—, reduciendo la tendencia a la deformación o el agrietamiento excesivos.

Una pieza de material cerámico que se haya moldeado por cualquiera de los métodos descritos hasta ahora se encuentra en estado en verde o crudo. La pieza en verde o cruda puede ser maquinada con el fin de acercarla a una forma casi neta. Aunque la pieza cruda debe manipularse con cuidado, el maquinado no es particularmente difícil debido a la suavidad relativa de los materiales.

La *cocción*, también conocida como *sinterizado*, consiste en calentar la pieza a una temperatura elevada en un ambiente controlado. Aunque durante la cocción se produce cierta contracción, la pieza de cerámico se hace más resistente y más dura. Esta mejora en las propiedades mecánicas se debe (a) al desarrollo de enlaces fuertes entre las complejas partículas de óxido presentes en el cuerpo del cerámico y (b) a la reducción de la porosidad. Una tecnología más reciente es el *sinterizado*

de cerámicos por microondas, el cual se realiza en hornos con generadores que producen microondas con frecuencias superiores a 2 GHz. El sinterizado por microondas puede ser considerablemente más rápido y menos costoso que el sinterizado convencional, además requiere menos energía por pieza.

Los **cerámicos de nanofase**, descritos en la sección 8.2.5, pueden sinterizarse a temperaturas más bajas que las utilizadas para los cerámicos convencionales. Son más fáciles de fabricar porque pueden (a) compactarse a temperatura ambiente hasta altas densidades, (b) prensarse en caliente hasta la densidad teórica y (c) formarse en piezas de forma neta sin usar aglomerantes o ayudas al sinterizado.

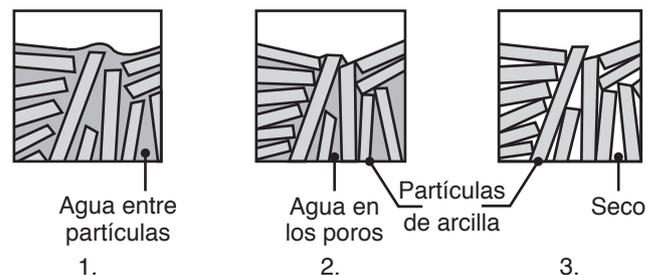


FIGURA 18.6 Contracción de la arcilla húmeda causada por la eliminación del agua durante el secado, la contracción puede ser hasta del 20% en volumen. Fuente: Según F. H. Norton.

EJEMPLO 18.1 Cambios dimensionales durante el moldeado de componentes cerámicos

Dado: Será fabricada una pieza de material cerámico sólida, cilíndrica y con longitud final, L , de 20 mm. Para este material, se ha establecido que las contracciones lineales durante el secado y la cocción sean de 7 y 6%, respectivamente, sobre la base de la dimensión ya seca, L_d .

Se solicita: Calcular (a) la longitud inicial, L_o , de la pieza y (b) la porosidad seca, P_d , si la porosidad de la pieza cocida, P_f , es de 3 por ciento.

Respuesta:

- a. Con base en la información proporcionada y observando que la cocción es precedida por el secado, podemos escribir

$$\frac{(L_d - L)}{L_d} = 0.06,$$

o

$$L = (1 - 0.06)L_d.$$

Por lo tanto,

$$L_d = \frac{20}{0.94} = 21.28 \text{ mm}$$

y

$$L_o(1 + 0.07)L_d = (1.07)(21.28) = 22.77 \text{ mm}.$$

- b. Dado que la porosidad final es de 3%, el volumen real, V_a , del material sólido en la pieza es

$$V_a = (1 - 0.03)V_f = 0.97V_f,$$

donde V_f es el volumen de la pieza después de la cocción. Debido a que la contracción lineal durante el proceso de cocción es del 6%, se puede determinar el volumen seco, V_d , de la pieza como

$$V_d = \frac{V_f}{(1 - 0.06)^3} = 1.2V_f.$$

Por lo tanto,

$$\frac{V_a}{V_d} = \frac{0.97}{1.2}, \text{ u } 81\%.$$

Por lo tanto, la porosidad, P_d , de la pieza seca es del 19 por ciento.

18.2.5 Operaciones de acabado

Debido a que la cocción ocasiona cambios dimensionales, se pueden realizar operaciones adicionales para (a) dar a la pieza de cerámico su forma final, (b) eliminar los defectos superficiales y (c) mejorar su acabado superficial y la precisión dimensional. Aunque son materiales duros y frágiles, se han realizado avances importantes en la producción de **cerámicos maquinables** y **cerámicos rectificables**, lo cual permite la producción de componentes cerámicos con alta precisión dimensional y buen acabado superficial. Un ejemplo es el carburo de silicio, que puede maquinarse en formas finales a partir de piezas en bruto sinterizadas.

Los procesos de acabado empleados pueden consistir en una o más de las siguientes operaciones, las cuales se describen con detalle en diversas secciones de la parte IV:

1. *Rectificado*, con un disco de diamante.
2. *Lapeado y asentado (honing)*.
3. *Maquinado ultrasónico*.
4. *Taladrado*, utilizando una broca con recubrimiento de diamante.
5. *Maquinado por descarga eléctrica*.
6. *Maquinado por rayo láser*.
7. *Corte por chorro de agua abrasivo*.
8. *Tamborado (tumbling)*, para eliminar bordes afilados y marcas de rectificado.

El proceso de selección es una consideración importante debido a la naturaleza frágil de la mayoría de los cerámicos y a los costos adicionales relacionados con el uso de algunos de estos procesos. También debe considerarse el efecto de la operación de aca-

bado en las propiedades del producto. Por ejemplo, debido a la sensibilidad a la muesca, cuanto más fino sea el acabado superficial de la pieza mayor será su resistencia y capacidad de carga, en particular su resistencia a la fatiga. Las piezas de material cerámico también pueden experimentar *fatiga estática*, como se describe para el caso del vidrio en la sección 18.5.

Con el fin de mejorar su apariencia y resistencia y para hacerlos impermeables, los productos cerámicos suelen recubrirse con una **pasta** o **esmalte** (sección 34.12) que forma un revestimiento vítreo después de la cocción.

18.3 Formado y moldeado del vidrio

El vidrio se procesa al fundirlo y moldearlo, ya sea por soplado o en moldes. Las formas producidas incluyen hojas planas y placas, varillas, tubos, fibras de vidrio y productos discretos, como botellas, focos, linternas, lentes y utensilios de cocina. Los productos de vidrio pueden tener diversos espesores, los cuales pueden ser tan gruesos como los grandes espejos de los telescopios o bien tan finos como los adornos para un árbol de navidad. La resistencia del vidrio puede mejorarse mediante tratamientos térmicos y químicos —que inducen esfuerzos residuales superficiales de compresión— o por medio de su laminado con una hoja delgada de plástico tenaz.

Por lo general, los productos de vidrio pueden clasificarse como:

1. **Vidrio plano en placa o lámina**, que varía en espesor desde casi 0.8 mm hasta 10 mm (0.03 a 0.4 pulg) y se utiliza como ventanas de vidrio, puertas de vidrio y cubiertas de mesa.
2. **Varillas y tubos**, que se usan en las luces de neón, como objetos decorativos y para el procesamiento y manejo de productos químicos.
3. **Productos discretos**, como botellas, jarrones y anteojos.
4. **Fibras de vidrio**, que son empleadas para reforzar materiales compósitos (sección 9.2.1) y en las fibras ópticas.

Todos los procesos de formado y moldeado comienzan con vidrio fundido —a una temperatura que normalmente se encuentra en el rango de 1000 a 1200 °C (1830 a 2200 °F)— y que tiene el aspecto de un líquido viscoso de color rojo vivo.

18.3.1 Vidrio plano en lámina o placa

El vidrio plano en forma de láminas puede hacerse por cualquiera de los siguientes tres métodos a partir del estado fundido, con el vidrio suministrado desde un horno o tanque de fusión:

1. En el **método de flotado** (figura 18.7), el vidrio fundido en el horno se introduce en un baño de grandes dimensiones, donde el vidrio, bajo una atmósfera controlada y a una temperatura de 1150 °C (2100 °F), flota sobre un baño de estaño fundido. El vidrio pasa entonces a una temperatura aproximada de 650 °C (1200 °F) sobre los rodillos de otra cámara (*túnel de recocido*), donde se solidifica. El *vidrio flotado* tiene superficies lisas (*pulidas a fuego*), por lo que no se requieren otras operaciones de acabado, como rectificado o pulido. El ancho del producto puede ser de hasta 4 m (13 pies). Mediante este proceso se hacen vidrios delgados o laminados y en placas.
2. El proceso de **estirado** para la fabricación de hojas o placas planas consiste en pasar el vidrio fundido a través de un par de rodillos (figura 18.8a). El vidrio en solidificación se prensa entre estos dos rodillos, formando una hoja; después se le desplaza hacia adelante sobre un conjunto de rodillos más pequeños.

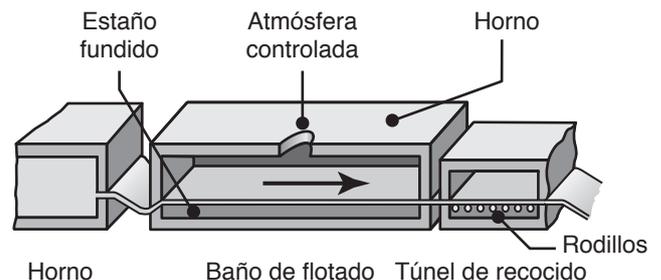


FIGURA 18.7 Método de flotado para la fabricación de vidrio plano.

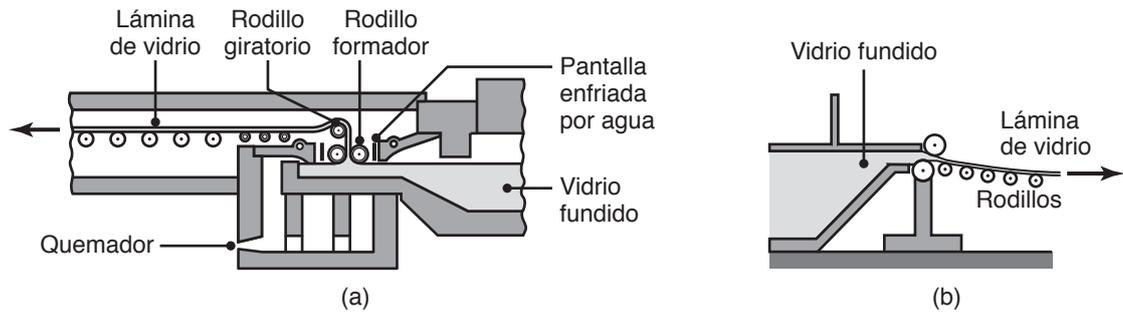


FIGURA 18.8 (a) Proceso de estirado para la fabricación de vidrio plano a partir de un baño fundido. (b) Proceso de laminado. Fuente: Según W. D. Kingery.

- En el proceso de laminado (figura 18.8b), el vidrio fundido se comprime entre rodillos impulsados, formando de este modo una lámina u hoja, con una superficie que es algo áspera. Las superficies del vidrio también pueden hacerse en relieve con un patrón, utilizando las superficies texturizadas de un rodillo. De esta manera, la superficie del vidrio se convierte en una réplica de la superficie del rodillo.

18.3.2 Tubos y varillas

Los *tubos* de vidrio se producen mediante el proceso mostrado en la figura 18.9. El vidrio fundido se envuelve alrededor de un mandril hueco giratorio (cilíndrico o en forma de cono) y se estira por medio de un juego de rodillos. A través del mandril, se sopla aire para evitar que el tubo de vidrio colapse. Las máquinas pueden ser horizontales, verticales o inclinadas con pendiente negativa. Este método también se utiliza en la fabricación de tubos de vidrio para lámparas fluorescentes.

Un método alternativo para la fabricación de tubos consiste en la *extrusión* de una tira de vidrio (con una sección transversal rectangular delgada), la cual después se envuelve de manera oblicua (formando un ángulo) en torno a un mandril giratorio. Las tiras de vidrio fundido se unen entre sí a lo largo de los bordes formando un tubo continuo, que luego se estira en el mandril de manera continua.

Las *varillas* de vidrio se extruyen o estiran directamente a partir de un baño fundido, sin la presurización interna necesaria para hacer tubos.

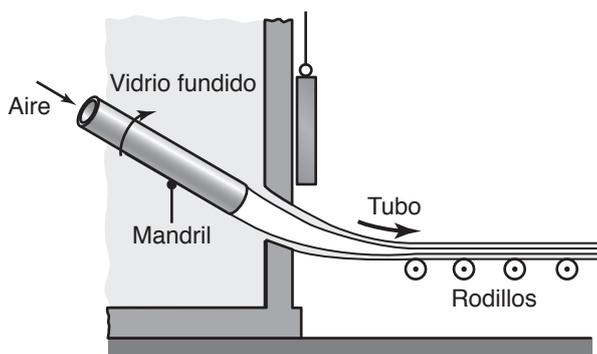


FIGURA 18.9 Proceso de manufactura para tubos de vidrio; se sopla aire a través del mandril para evitar que el tubo colapse; los tubos de vidrio para lámparas fluorescentes se hacen por este método.

18.3.3 Productos discretos de vidrio

Soplado. Los artículos de vidrio huecos y con paredes delgadas, como botellas, vasos y frascos, se hacen mediante el *soplado*, un proceso similar al moldeo por soplado de los polímeros termoplásticos (sección 19.4). En la figura 18.10 se muestran los pasos involucrados en la producción de una botella de vidrio ordinaria mediante el proceso de soplado. El aire soplado expande una masa hueca de vidrio calentado contra las paredes interiores del molde. Las superficies de los moldes suelen estar cubiertas con un agente separador, como un aceite o una emulsión, para evitar que el vidrio se pegue al molde. El soplado puede estar seguido de una segunda operación de soplado para finalizar la forma del producto, lo cual se denomina *proceso de soplado tras soplado*.

El acabado superficial de las piezas fabricadas por soplado es aceptable para la mayoría de las aplicaciones, como botellas y jarras. Es difícil controlar con precisión el espesor de la pared del producto, debido a la falta de un molde interior, pero este proceso es económico para altas tasas de producción.

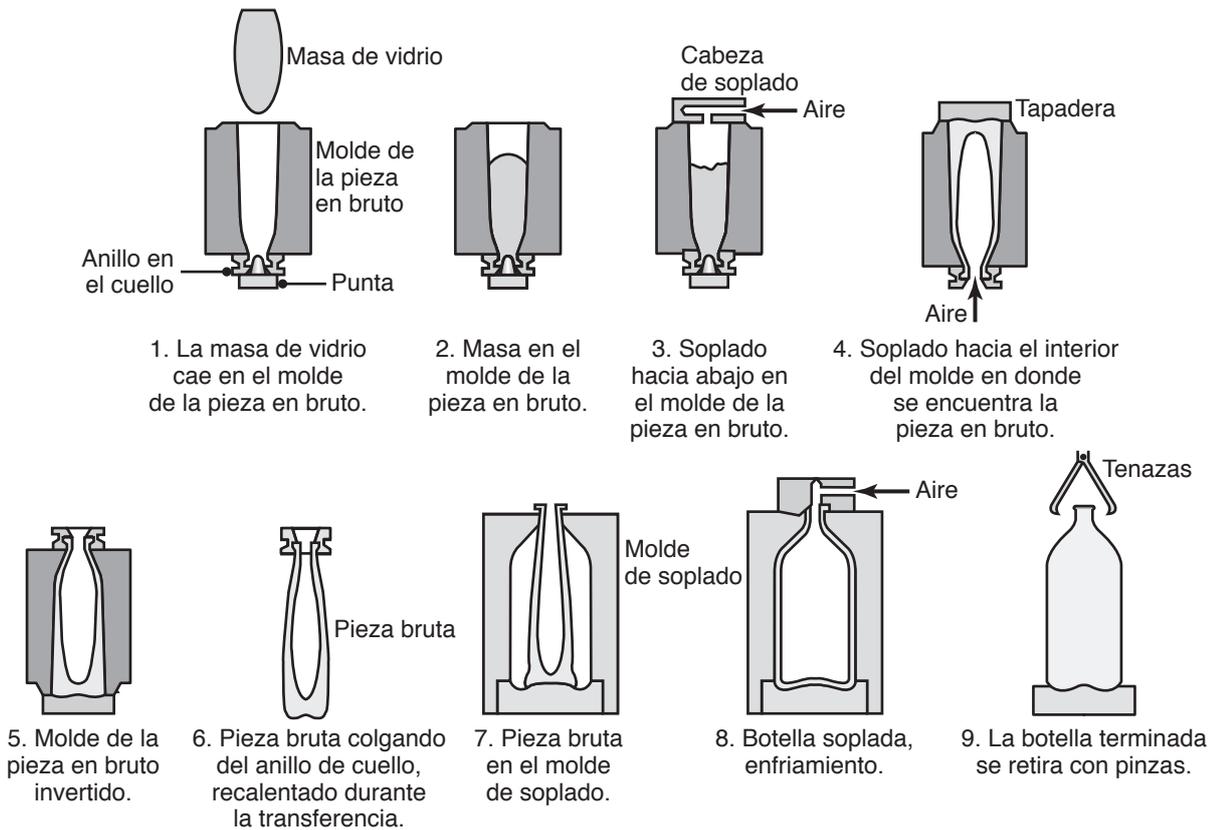


FIGURA 18.10 Pasos en la fabricación de una botella de vidrio ordinaria. Fuente: Según F. H. Norton.

Prensado. En el método de *prensado*, una masa de vidrio fundido se coloca en un molde y se presiona dentro de una cavidad confinada con un émbolo, por lo que el proceso es similar a la forja en dado cerrado. El molde puede estar hecho de una sola pieza, como se muestra en la figura 18.11, o ser un molde partido (figura 18.12). Después del prensado, el vidrio solidificado adquiere la forma de la cavidad del molde de émbolo. Debido al ambiente confinado, el producto tiene una mejor precisión dimensional que la que se puede obtener por soplado.

El prensado en moldes de una sola pieza no puede utilizarse para (a) formas de piezas en las que el émbolo no pueda retraerse o (b) artículos de pared delgada, debido a los altos requerimientos de fuerza y a la distorsión después de retirar la pieza. Por ejemplo, para las botellas se utilizan moldes de dos piezas, mientras que, para los artículos de pared delgada, el prensado puede combinarse con el soplado. En este último proceso, conocido como *prensado y soplado*, la pieza presionada se somete a presión por aire (de ahí el término soplado), la cual expande posteriormente el vidrio fundido en el molde.

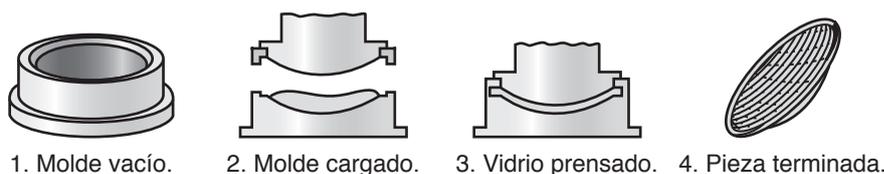


FIGURA 18.11 Manufactura de un artículo de vidrio mediante el prensado de vidrio fundido en un molde. Fuente: Con base en datos de Corning Glass Works.



Código QR 18.1 Demostración de la producción de botellas de vidrio. (Fuente: Cortesía de Owens-Illinois, Inc.).

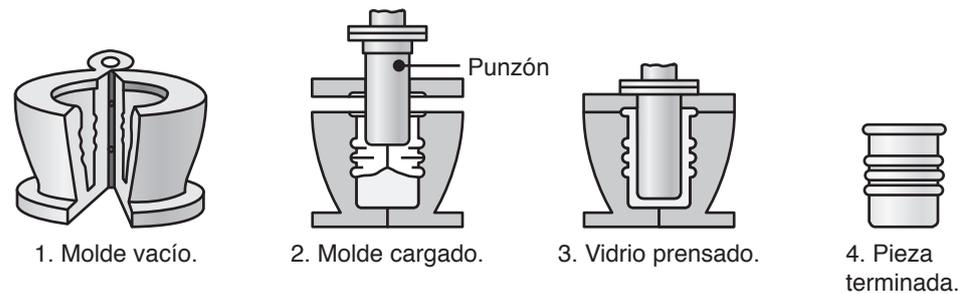


FIGURA 18.12 Prensado de vidrio fundido en un molde partido. *Fuente:* Según E. B. Shand.

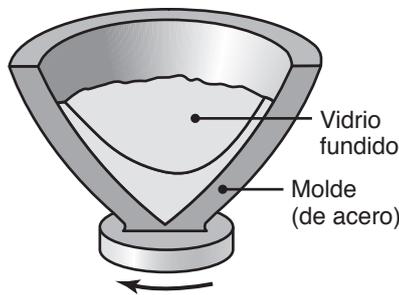


FIGURA 18.13 Colado centrífugo de vidrio; mediante este proceso, se hacen los grandes lentes de telescopio y tubos de cinescopio. *Fuente:* Con base en datos de Corning Glass Works.

Colado centrífugo. También conocido, en la industria del vidrio, como **rechazado** (figura 18.13), este proceso es similar al que se utiliza para los metales (vea la sección 11.4.6). La fuerza centrífuga empuja el vidrio fundido contra la pared del molde, donde empieza a solidificarse. Los productos típicos que se fabrican son grandes lentes para telescopios de investigación y formas arquitectónicas.

Moldeo por hundimiento. Las piezas de vidrio en forma de un plato delgado o ligeramente grabadas pueden hacerse mediante el proceso de moldeo por *hundimiento* (*sagging*). Una lámina de vidrio caliente se coloca sobre un molde y se calienta, con lo que el vidrio se hunde por su propio peso y toma la forma del molde. El proceso es similar al termoformado de los polímeros termoplásticos (sección 19.6), pero aquí no se involucra presión o vacío. Las piezas típicas que se fabrican son platos, lentes para los armazones de las gafas contra la luz solar, espejos para telescopios y tableros de iluminación.

Manufactura de vidrios cerámicos. Los vidrios cerámicos (nombres comerciales: *Pyroceram*, *Corningware*) contienen grandes proporciones de diversos óxidos, como se señala en la sección 8.5. Su manufactura implica una combinación de los métodos utilizados para los cerámicos y los vidrios. Los vidrios cerámicos son moldeados en productos discretos, como platos y sartenes para hornear, y luego se tratan térmicamente, con lo cual el vidrio se convierte en *desvitrificado* (recristalizado).

18.3.4 Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio continuas se estiran a través de múltiples orificios (de 200 a 400 orificios), hechos en placas de platino calentadas, a velocidades de hasta 500 m/s (1700 pies/s). Aplicando este método es posible producir fibras con diámetros tan pequeños como 2 μm (80 μpulg). Para proteger sus superficies, las fibras se recubren posteriormente con productos químicos conocidos como *resinas protectoras*, que son principalmente compuestos de silano en agua, pero es posible hacer muchas mezclas de resinas. Las fibras cortas se producen sometiendo las fibras largas a aire comprimido o vapor de agua mientras salen del orificio.

La *lana de vidrio* (fibras de vidrio cortas o fibras de vidrio flexibles entrelazadas) que se utiliza como un material de aislamiento térmico y acústico se fabrica mediante un *proceso de rociado centrífugo*, en el que se expulsa vidrio fundido (*rechazado de fibras*) a partir de un cabezal giratorio. Por lo general, el diámetro de las fibras oscila entre 20 y 30 μm (800 y 1200 μpulg).

18.4 Técnicas para reforzar y tratar térmicamente al vidrio

El vidrio se puede reforzar mediante una serie de procesos y los productos discretos de vidrio pueden someterse a recocido y otras operaciones de acabado para impartirles las propiedades y características superficiales deseadas.

Templado térmico. En este proceso, también llamado *templado físico* o *templado por congelamiento*, las superficies del vidrio caliente se enfrían rápidamente aplicándoles una ráfaga de aire (figura 18.14). Como resultado, las superficies se contraen y, en un primer momento, desarrollan esfuerzos de tensión. Enseguida, la mayor parte del vidrio comienza a enfriarse y, como se contrae, sus ya solidificadas superficies también se ven obligadas a contraerse. En consecuencia, se desarrollan esfuerzos residuales de compresión en las superficies mientras que el interior desarrolla esfuerzos de tensión (vea también la sección 2.11). Los esfuerzos de compresión superficiales mejoran la resistencia del vidrio en la misma forma que lo hacen los metales y otros materiales.

Cuanto mayor sea el coeficiente de dilatación térmica del vidrio y menor sea su conductividad térmica, más grandes serán los esfuerzos residuales desarrollados y, por lo tanto, el vidrio se volverá más resistente. El templado térmico toma un tiempo relativamente corto (minutos) y puede aplicarse a la mayoría de los vidrios. Debido a la alta cantidad de energía almacenada en los esfuerzos residuales, el **vidrio templado** se hace añicos cuando se rompe. Las piezas rotas no son tan agudas y peligrosas como las de una ventana de vidrio ordinaria, que tiene una trayectoria de fractura dentada y aguda.

Templado químico. En este proceso, el vidrio se calienta en un baño fundido de KNO_3 , K_2SO_4 o NaNO_3 , dependiendo del tipo de vidrio. Posteriormente, se da origen al intercambio de iones, donde los átomos de mayor tamaño sustituyen a los átomos más pequeños en la superficie del vidrio. Como resultado, se desarrollan esfuerzos residuales de compresión en la superficie. Esta condición es similar a la creada al forzar una cuña entre dos ladrillos en una pared.

El templado químico puede llevarse a cabo a diferentes temperaturas. A bajas temperaturas, la distorsión de la pieza es mínima, por lo que es posible manipular piezas con formas complejas. A temperaturas elevadas, puede haber algo de distorsión de la pieza, pero el producto se puede utilizar a temperaturas más altas y sin pérdida en su resistencia. El tiempo requerido para el templado químico es mucho más largo que para el templado térmico.

Vidrio laminado. El vidrio laminado es producto de otro método de refuerzo. Llamado *refuerzo por laminado*, consiste en dos piezas de vidrio plano con una hoja delgada de plástico tenaz en medio. Así, cuando el vidrio laminado se agrieta, los trozos permanecen unidos por la lámina de plástico y se vuelven mucho menos peligrosos, un fenómeno que se observa comúnmente en el parabrisas roto de un automóvil.

El vidrio plano para ventanas y puertas de vidrio puede reforzarse con una red de alambre (por ejemplo, *tela metálica* con una malla hexagonal) embebida en el vidrio durante su producción. Cuando un objeto duro impacta la superficie, el vidrio se rompe, pero las piezas se mantienen unidas por el alambre embebido, que tiene resistencia y ductilidad y, por consiguiente, tenacidad (vea la sección 2.2.4).

Vidrio a prueba de balas. El vidrio laminado tiene una considerable resistencia al impacto balístico —y puede impedir la penetración completa de objetos sólidos— debido a la presencia de una película de polímero resistente entre las dos capas de vidrio. El *vidrio a prueba de balas* (utilizado en algunos automóviles, vehículos blindados de uso bancario y edificios) es un diseño más desafiante debido a la muy alta velocidad y al muy alto nivel de energía de una bala y al pequeño tamaño y la pequeña forma de la punta de la bala, que implica una reducida área de contacto y altos esfuerzos localizados. Según el calibre

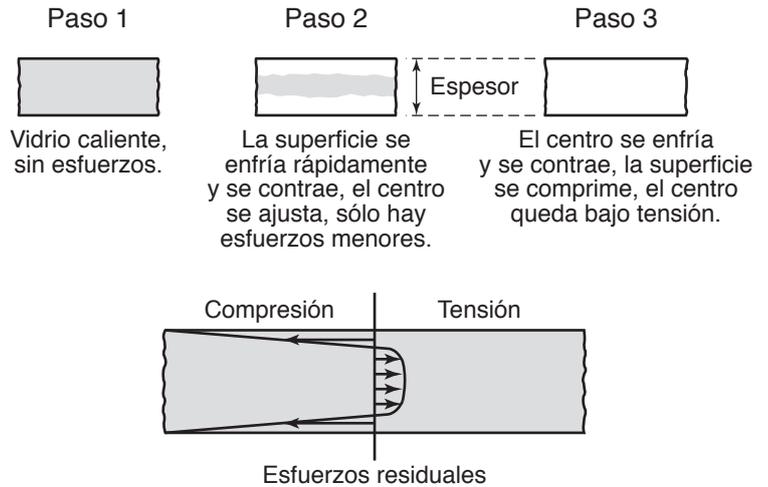


FIGURA 18.14 (a) Etapas en la inducción de esfuerzos residuales de compresión superficiales para mejorar la resistencia. (b) Esfuerzos residuales en una placa de vidrio templado. Fuente: Cortesía de Corning Glass Works.

del arma, las velocidades aproximadas de las balas se encuentran entre 350 y 950 m/s (1150 y 3100 pies/s).

El vidrio a prueba de balas, también llamado *vidrio resistente a las balas*, tiene espesores en el rango de 7 a 75 mm (0.3 a 3 pulg). Las placas de vidrio más delgadas están diseñadas para ser resistentes a balas de pistola y las placas más gruesas son para balas de rifle. Aunque hay diversos diseños, el vidrio a prueba de balas se compone básicamente de vidrio laminado con una lámina de polímero (normalmente policarbonato). La capacidad de un vidrio a prueba de balas para detener una bala depende (a) del tipo y grosor del vidrio, (b) del tamaño, la forma, el peso y la velocidad de la bala y (c) de las propiedades y el espesor de la lámina del polímero.

En el vidrio a prueba de balas suelen usarse hojas de policarbonato. Como un material ampliamente utilizado para cascos de seguridad, parabrisas y guardas de maquinaria, el policarbonato es un polímero resistente y flexible. Laminado con un vidrio grueso, puede detener una bala, aunque el vidrio en sí desarrolla una región circular que se destroza. La unión adecuada de las interfases de vidrio y polímero también es una consideración importante, puesto que generalmente hay más de una ronda de disparos durante los enfrentamientos armados. Por otra parte, con el fin de mantener la transparencia del vidrio y reducir al mínimo la distorsión, el *índice de refracción* del vidrio y el del polímero deben ser casi idénticos.

Si la lámina de polímero se une en un solo lado del vidrio, éste se conoce como vidrio a prueba de balas de *un sentido*. En un vehículo, la capa de polímero está en la superficie interior del cristal. Una bala exterior no puede penetrar la ventana porque la bala golpea el cristal primero, rompiéndolo. El vidrio absorbe parte de la energía de la bala, lo cual la desacelera. La energía restante se disipa en la lámina de polímero, con lo que la bala se detiene. Esta disposición permite que alguien que esté dentro de un vehículo blindado pueda devolver el fuego. Una bala disparada desde el interior penetra en la hoja de polímero y obliga a que el vidrio se rompa hacia el exterior, lo cual permite que la bala pase. Por lo tanto, un vidrio de un solo sentido detiene una bala disparada desde fuera, pero permite el paso de una bala disparada desde el interior.

Un diseño más reciente para el vidrio a prueba de balas se compone de dos capas adyacentes de lámina de polímero termoplástico sobre la misma superficie de vidrio y se basa en un principio algo diferente:

- La capa expuesta externamente (el lado donde entra la bala) es una lámina de acrílico (polimetilmetacrilato, PMMA). Esta lámina *achata* la punta de la bala, lo cual desacelera la bala y disminuye su capacidad para penetrar fácilmente debido a que su punta ya es chata. Además, la película acrílica tiene una alta resistencia al clima, haciéndola adecuada como capa exterior expuesta a los elementos de la intemperie.
- La siguiente capa tras el vidrio es una lámina de policarbonato. Debido a que tiene alta tenacidad, la capa de policarbonato detiene la bala que ya ha sido desacelerada al penetrar primero en la lámina acrílica. El vidrio se rompe de la misma forma que en los otros diseños.

18.4.1 Operaciones de acabado

Igual que en los productos de metal, se pueden desarrollar esfuerzos residuales en los productos de vidrio si no se enfrían a una velocidad lo suficientemente baja. Con el fin de garantizar que el producto está libre de estos esfuerzos, el vidrio es **recocido** mediante un proceso semejante al recocido para el relevado de esfuerzos en los metales (sección 4.11). Primero, el vidrio se calienta a cierta temperatura y luego se enfría lentamente. Dependiendo del tamaño, del grosor y del tipo de vidrio, los tiempos de recocido pueden variar desde unos pocos minutos hasta 10 meses, como sucedió en el caso de un espejo de 600 mm (24 pulg) fabricado para el telescopio de un observatorio.

Además del recocido, los productos de vidrio pueden someterse a otras operaciones, como corte, taladrado, rectificado y pulido. Bordes y esquinas con filo pueden suavizarse (a) por esmerilado (como puede verse en las cubiertas de cristal para escritorios y estantes)

o (b) al colocar un soplete contra los bordes (**pulido a fuego**), esto los redondea mediante el reblandecimiento localizado del vidrio y el posterior efecto de tensión superficial.

En todas las operaciones de acabado de vidrio y otros materiales frágiles, se debe tener cuidado para asegurarse de que no haya daños en la superficie, en especial elevadores del esfuerzo, como el acabado superficial áspero o rugoso y las raspaduras. Debido a su sensibilidad a la muesca, incluso una sola raspadura en el vidrio puede causar falla prematura, especialmente si la raspadura está en una dirección donde los esfuerzos de tensión son máximos (vea también la figura 16.17).

18.5 Consideraciones de diseño para cerámicos y vidrios

Los productos cerámicos y de vidrio requieren una cuidadosa selección de la composición, los métodos de procesamiento, las operaciones de acabado y los métodos de ensamble con otros componentes. Con características como una pobre resistencia a la tensión, sensibilidad a los defectos internos y externos, baja tenacidad al impacto y fatiga estática, las consecuencias de una falla en la pieza son siempre un factor importante a considerar en el diseño de productos cerámicos y de vidrio. Por otro lado, estas limitaciones deben equilibrarse con las características deseables de los materiales, como dureza, resistencia a las raspaduras, resistencia a la compresión a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas, además de una amplia gama de diversas propiedades físicas.

Como se indicó en la sección 8.3.1, los cerámicos y los vidrios experimentan un fenómeno llamado *fatiga estática*, por lo que pueden fracturarse en forma súbita bajo una carga estática después de algún periodo. Aunque este comportamiento no se produce al vacío ni en aire seco, deben tomarse las medidas pertinentes para evitar tal falla. Una regla general es que, para que un artículo de vidrio soporte una carga de 1000 horas o más, el esfuerzo máximo que puede aplicársele es aproximadamente un tercio del esfuerzo máximo que puede soportar durante el primer segundo de carga. El control de los parámetros de procesamiento y de la calidad de las materias primas, así como del nivel de impurezas presentes en éstas, es importante.

Los cambios dimensionales, la deformación o alabeo y la posibilidad de que aparezcan grietas durante el procesamiento y la vida de servicio son factores importantes en la selección de métodos para modelar estos materiales. Cuando un cerámico o un vidrio es componente de un ensamble más grande, su compatibilidad con los otros componentes es otra consideración importante. El tipo de fuerzas externas y la dilatación térmica son especialmente significativos, como ocurre en los sellos y ventanas con marcos metálicos. Recuerde la tabla 3.1, donde se presenta un amplio rango de coeficientes de dilatación térmica para varios materiales metálicos y no metálicos. Por lo tanto, cuando una placa de vidrio se ajusta firmemente en un marco metálico para ventana, las variaciones de temperatura (por ejemplo si el sol alumbra sólo una parte de la ventana) pueden causar esfuerzos térmicos que pueden conducir a la formación de grietas, un fenómeno que se observa comúnmente en algunos edificios altos. Una solución común consiste en colocar sellos de hule entre el vidrio y el marco de la ventana para permitir cambios dimensionales.

18.6 Procesamiento de superconductores

Aunque los *superconductores* (sección 3.7) tienen un gran potencial de ahorro de energía en la generación, el almacenamiento y la distribución de energía eléctrica, su procesamiento en formas y tamaños útiles para las aplicaciones prácticas ha presentado dificultades importantes. Existen dos tipos básicos de superconductores:

1. Los metales, llamados *superconductores de baja temperatura* (LTSC, por sus siglas en inglés), incluyen combinaciones de niobio, estaño y titanio. Por ejemplo, con aleaciones de niobio y estaño, enfriadas mediante helio líquido, se fabrica el imán superconductor utilizado en la mayoría de los exploradores de *imagen de resonancia magnética* (MRI, por sus siglas en inglés) para diagnóstico médico.

2. Los cerámicos, llamados **superconductores de alta temperatura** (HTSC, por sus siglas en inglés), incluyen diversos óxidos de cobre. Aquí, el término temperatura “alta” significa que está más cerca de la temperatura ambiente, aunque los HTSC que son comercialmente importantes mantienen su superconductividad por encima del punto de ebullición del nitrógeno líquido ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $-321\text{ }^{\circ}\text{F}$).

Los materiales superconductores cerámicos están disponibles en forma de polvo. La dificultad para manufacturarlos se debe a (a) su fragilidad inherente y (b) su anisotropía, la cual hace difícil alinear los granos en la dirección apropiada para lograr una alta eficiencia. Cuanto menor sea el tamaño de grano, más difícil será alinear los granos.

El proceso de manufactura básico para los superconductores consiste en los siguientes pasos:

1. Preparación de los polvos mediante su mezcla y molienda en un molino de bolas hasta un tamaño de grano entre 0.5 y $10\text{ }\mu\text{m}$.
2. Formado del polvo en la forma deseada.
3. Tratamiento térmico del producto para mejorar sus propiedades.

El proceso de formado o moldeo más común es el método del **polvo de óxido en tubo** (OPIT, por sus siglas en inglés). Primero, el polvo se envasa en tubos de plata (porque la plata tiene la más alta conductividad eléctrica entre todos los metales; vea la tabla 3.1) y se sella en ambos extremos. Luego, los tubos se deforman por medio de procesos como forjado rotatorio, trefilado o estirado, extrusión, prensado isostático y laminado. El producto final puede tomar la forma de un alambre, una cinta, una bobina u otro cuerpo volumétrico.

Otros métodos de procesamiento de los superconductores son: (a) el recubrimiento de alambre de plata con material superconductor, (b) la deposición de películas superconductoras mediante ablación con láser, (c) el formado mediante un proceso de cuchilla de doctor (sección 18.2.1), (d) el revestimiento por explosión y (e) la aspersión o rociado químico. Después, la pieza formada puede tratarse térmicamente para mejorar la alineación de los granos del polvo superconductor.

CASO DE ESTUDIO 18.1 Producción de cintas superconductoras para altas temperaturas

Existen dos óxidos basados en bismuto que tienen preferencia como materiales superconductores cerámicos para diversas aplicaciones militares y comerciales, como la propulsión eléctrica para barcos y submarinos, los sistemas de rastreo de minas terrestres y de aguas poco profundas, los generadores de cables de transmisión y el almacenamiento de energía magnética superconductor (SMES, por sus siglas en inglés). Se han explorado diferentes métodos de procesamiento para producir alambres y cintas con filamentos múltiples. El proceso de *polvo en tubo* (figura 18.15) se ha utilizado con éxito en la fabricación de cables y cintas base bismuto de gran longitud y con propiedades deseables. El

siguiente ejemplo ilustra este método para la producción de cintas superconductoras para altas temperaturas y con filamentos múltiples:

1. Primero, se produce una palanquilla de material compuesto usando una carcasa de plata y polvo cerámico. La carcasa se hace con una plata recocida de alta pureza, la cual se rellena con polvo cerámico de bismuto en una atmósfera inerte. Se utiliza un ariete de acero para compactar la carcasa en varios pases hasta alcanzar una densidad relativa del 30%. Con el fin de minimizar los gradientes de densidad, como los mostrados

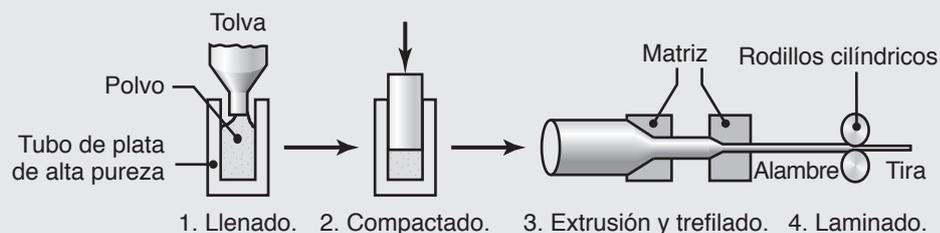


FIGURA 18.15 Ilustración esquemática del proceso de polvo en tubo.

en la figura 17.12, se añade aproximadamente un gramo de polvo a la palanquilla por cada carrera del ariete. Cada palanquilla se pesa y mide para verificar la densidad inicial de compactado. Los extremos de la palanquilla se sellan con una aleación de plata para evitar su contaminación durante el procesamiento posterior.

2. Enseguida, la palanquilla se extruye y trefila (estira) para reducir su diámetro y aumentar la densidad del polvo. Las palanquillas se trefilan en un banco de trefilado (vea la figura 15.24) para obtener un alambre con diámetro definitivo de 1.63 mm. La realización de esta tarea requiere 12 pases con una reducción del 20% por pase. Las matrices tienen un ángulo semicónico de 8° y la velocidad de trefilado es de aproximadamente 1.4 m/min. Puede usarse un aceite semisoluble o un rocío de estearato de zinc como lubricante.

3. Después del proceso de trefilado, el alambre se transforma progresivamente en una cinta mediante un molino de laminación de un solo castillo en configuraciones de dos o cuatro niveles. Para el caso de cuatro niveles, el diámetro de los rodillos de soporte (que son los rodillos de trabajo para la configuración de dos niveles) es de 213 mm y el diámetro de los rodillos de trabajo es de 63.5 mm. Las dimensiones finales de la cinta son grosores de entre 100 y 200 μm y anchuras de 2 a 3 mm, con un núcleo cerámico que va de 40 a 80 μm de espesor y de 1.0 a 1.5 mm de anchura.

Fuente: Con base en datos de S. Vaze y M. Pradheeradhi, Concurrent Technologies Corporation.

RESUMEN

- Los productos cerámicos se moldean mediante varias técnicas de vaciado o colado, formado plástico o prensado. Después, las piezas se secan y cuecen para impartirles resistencia y dureza. Se pueden realizar operaciones de acabado, como el maquinado y el rectificado, con el fin de dar a la pieza su forma final y precisión dimensional, o bien se puede someter a tratamientos superficiales. Debido a su fragilidad inherente, los cerámicos se procesan tomando en cuenta la distorsión y el agrietamiento. El control de los parámetros de calidad y del procesamiento de la materia prima también es importante.
- Los productos de vidrio se hacen mediante diversos procesos de moldeo similares a los utilizados para los cerámicos y plásticos. Están disponibles en una amplia variedad de formas, composiciones y propiedades mecánicas, físicas y ópticas. Su resistencia se puede mejorar mediante tratamientos térmicos y químicos.
- Los métodos continuos para el procesamiento de vidrio son el estirado, el laminado y el flotado. Los productos de vidrio discretos pueden fabricarse por soplado, prensado, colado centrífugo o moldeo por hundimiento. Después, las piezas pueden recocerse para aliviar los esfuerzos residuales.
- Las consideraciones de diseño para los cerámicos y los vidrios están guiadas por factores como su baja resistencia a la tensión y su tenacidad, así como su sensibilidad a los defectos externos e internos. La distorsión y el agrietamiento durante la producción son consideraciones importantes.
- La manufactura de superconductores en productos útiles puede ser un reto debido a la anisotropía y la fragilidad inherente de los materiales involucrados. Aunque se están desarrollando nuevos procesos, el procedimiento básico consiste en el compactado de polvo en un tubo de plata y su formado en las formas deseadas.

TÉRMINOS CLAVE

Agente humectante
Aglutinante
Barbotina
Cocción
Colado centrífugo
Defloculante

Fatiga estática
Formado plástico
Masa de vidrio
Moldeo por hundimiento
Moldeo por inyección
Plastificante

Prensado
Prensado en caliente
Prensado y soplado
Proceso cuchilla de doctor
Proceso del polvo de óxido en tubo

Pulido a fuego
Sinterizado con microondas
Soplado
Soplado tras soplado
Superconductores para altas temperaturas

Superconductores para bajas temperaturas
Templado químico

Templado térmico
Torneado
Trefilado o estirado

Vaciado de barbotina
Vidrio a prueba de balas
Vidrio flotado

Vidrio laminado
Vidrio templado

BIBLIOGRAFÍA

- Advanced Ceramic Technologies & Products, Springer, 2012.
- Bansal, N. P. y Boccaccini, A. R. (eds.), *Ceramics and Composites: Processing Methods*, Wiley-American Ceramic Society, 2012.
- Barsoum, M. W., *Fundamentals of Ceramics*, Taylor & Francis, 2002.
- Basu, B. y Balani, K., *Advanced Structural Ceramics*, Wiley-American Ceramic Society, 2011.
- Bengisu, M., *Engineering Ceramics*, Springer, 2010.
- Carter, C. B. y Norton, W. G., *Ceramic Materials: Science and Engineering*, Springer, 2007.
- Engineered Materials Handbook*, Vol. 4: *Ceramics and Glasses*, ASM International, 1991.
- Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing and Properties*, Academic Press, 2004.
- Harper, C. A. (ed.), *Handbook of Ceramics, Glasses, and Diamonds*, McGraw-Hill, 2001.
- Holand, W. y Beall, G. H., *Glass Ceramic Technology*, 2a. ed., Wiley-American Ceramic Society, 2012.
- King, A. G., *Ceramics Processing and Technology*, Noyes Publishing, 2001.
- Rahaman, M. N., *Ceramics Processing*, CRC Press, 2007.
- Richerson, D. W., *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design*, 3a. ed., Marcel Dekker, 2005.
- Riley, F. L., *Structural Ceramics: Fundamentals and Case Studies*, Cambridge, 2009.
- Shackelford, G. F. y Doremus, R. H., *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*, Springer, 2008.
- Shelby, J. E., *Introduction to Glass Science and Technology*, 2a. ed., Royal Society of Chemistry, 2005.

PREGUNTAS DE REPASO

- 18.1** Resuma los pasos involucrados en el procesamiento de (a) materiales cerámicos y (b) vidrios.
- 18.2** Liste y describa las funciones de los aditivos en los cerámicos.
- 18.3** Describa el proceso cuchilla de doctor.
- 18.4** Explique las ventajas del prensado isostático.
- 18.5** ¿Qué es el torneado? ¿Qué formas produce?
- 18.6** Mencione los parámetros que son importantes en el secado de productos cerámicos.
- 18.7** ¿Qué tipos de operaciones de acabado se utilizan en los cerámicos? ¿En los vidrios? ¿Por qué?
- 18.8** Describa los métodos mediante los cuales se fabrica el vidrio en láminas.
- 18.9** ¿Qué es el vidrio flotado?
- 18.10** ¿Qué es una masa de vidrio?
- 18.11** ¿Cómo se producen los tubos de vidrio?
- 18.12** ¿Cuál es la diferencia entre el templado físico y el templado químico del vidrio?
- 18.13** ¿Cuál es la estructura del vidrio laminado? ¿Del vidrio a prueba de balas?
- 18.14** ¿Cómo se hacen las fibras de vidrio? ¿Cuáles son sus dimensiones?
- 18.15** Describa los procesos de templado químico y templado térmico del vidrio.
- 18.16** ¿Qué es un superconductor? ¿Cómo se hacen los superconductores en forma de alambre?
- 18.17** ¿El diamante es un material cerámico? Explique su respuesta.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 18.18** Inspeccione diversos productos, observando su forma, color y transparencia, e identifique aquéllos que estén hechos de (a) cerámicos, (b) vidrio y (c) vidrio cerámico.
- 18.19** Describa las diferencias y semejanzas entre el procesamiento de polvos metálicos y el de materiales cerámicos.
- 18.20** ¿Qué propiedad de los vidrios les permite expandirse a grandes dimensiones mediante el soplado? ¿Pueden los metales someterse a este tipo de comportamiento? Explique su respuesta.
- 18.21** Explique por qué las piezas de cerámicos pueden distorsionarse o deformarse durante el secado. ¿Qué precauciones deben tomarse para evitar esta situación?
- 18.22** ¿Qué propiedades deben tener las láminas plásticas para ser utilizadas en el vidrio laminado? ¿Por qué?
- 18.23** Se ha dicho que cuanto más grande sea el coeficiente de dilatación térmica de un vidrio y menor sea su conductividad térmica, mayor será el nivel de los esfuerzos residuales desarrollados. Explique por qué.

18.24 ¿Alguno de los procesos utilizados para hacer productos de vidrio discretos son semejantes a los estudiados en capítulos anteriores? Describalos.

18.25 El moldeo por inyección es un proceso que se usa para metales en polvo, polímeros y materiales cerámicos. Explique el por qué de esta práctica.

18.26 Explique el fenómeno de la fatiga estática y cómo afecta la vida de servicio de un componente cerámico o de vidrio.

18.27 Describa y explique las diferencias que existen en el modo en que cada uno de los siguientes materiales se fractura-

ría al ser golpeado con un trozo pesado de roca: (a) vidrio ordinario para ventanas, (b) vidrio templado y (c) vidrio laminado.

18.28 ¿En el vaciado de barbotina se desarrollan rebabas? ¿Cómo propone usted eliminar tales rebabas?

18.29 Explique las dificultades que implica la fabricación de componentes cerámicos grandes. ¿Qué recomendaciones haría usted para mejorar el proceso?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

18.30 Usando el ejemplo 18.1, calcule (a) la porosidad de la pieza seca, si la porosidad de la pieza cocida debe ser del 9%, y (b) la longitud inicial, L_0 , de la pieza si las contracciones lineales durante el secado y la cocción son del 8 y 7%, respectivamente.

18.31 ¿Cuáles serían las respuestas al problema 18.30 si las cantidades dadas se reducen a la mitad?

18.32 Suponga que usted es un profesor que cubre los temas descritos en este capítulo y aplicará un examen de los aspectos numéricos para probar la comprensión de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

18.33 Liste las semejanzas y diferencias entre los procesos descritos en este capítulo y los de (a) la parte II sobre la fundición de metales y (b) la parte III sobre el formado y moldeo.

18.34 Considere algunos productos cerámicos con los que esté familiarizado y bosqueje la secuencia de procesos que usted crea se utilizaron en su manufactura.

18.35 Realice una búsqueda en la literatura técnica y describa las diferencias, si las hay, entre la calidad de las fibras de vidrio fabricadas para su uso en plásticos reforzados y las que se fabrican para ser usadas en las comunicaciones por fibra óptica. Comente sus observaciones.

18.36 ¿Qué tan diferentes son, en caso de serlo, las consideraciones de diseño para los cerámicos y para otros materiales? Explique su respuesta.

18.37 Visite una tienda de artículos de cerámica y alfarería e investigue las diferentes técnicas que se utilizan para pintar y decorar una pieza cerámica. ¿Cuáles son los métodos para aplicar un acabado metálico en la pieza?

18.38 Proporcione algunos ejemplos de diseños y aplicaciones en que debe tenerse en cuenta la fatiga estática.

18.39 Construya una tabla que describa el método con el que se fabrica un plato para comida a partir de (a) metales, (b) po-

límeros termoplásticos, (c) cerámicos, (d) polvos metálicos y (e) vidrio. Incluya en la tabla una descripción de las capacidades y deficiencias del proceso.

18.40 Los utensilios Pyrex para cocina muestran un fenómeno único: funcionan bien para un gran número de ciclos y luego se rompen en muchos trozos. Investigue este fenómeno, liste las posibles causas y comente los aspectos de manufactura que pueden aligerar o contribuir a tales fallas.

18.41 Se ha observado que la resistencia de los materiales frágiles, como cerámicos y vidrios, es muy sensible a los defectos superficiales, como raspaduras (sensibilidad a la muesca). Obtenga algunas piezas de estos materiales, ráspeles y pruébelos al sujetarlos cuidadosamente en una prensa de banco y doblarlos. Comente sus observaciones.

18.42 Describa los procesos que usted piensa pueden utilizarse para hacer (a) pequeñas estatuas de material cerámico, (b) azulejos para baños, (c) ladrillo común y (d) mosaicos o baldosines para piso.

18.43 Realice una búsqueda en la literatura y haga una lista de piezas o componentes de automóvil que estén hechos de cerámicos. Explique por qué están hechos con esos materiales.

19.1	Introducción	494
19.2	Extrusión	495
19.3	Moldeo por inyección	502
19.4	Moldeo por soplado	509
19.5	Moldeo rotacional	509
19.6	Termoformado	511
19.7	Moldeo por compresión	512
19.8	Moldeo por transferencia	513
19.9	Colado	514
19.10	Moldeo de espuma	515
19.11	Formado en frío y formado en fase sólida	516
19.12	Procesamiento de elastómeros	517
19.13	Procesamiento de compósitos de matriz polimérica	518
19.14	Procesamiento de compósitos de matriz metálica y cerámica	527
19.15	Consideraciones de diseño	528
19.16	Economía del procesamiento de plásticos y materiales compósitos	530

EJEMPLOS:

19.1	Película soplada	501
19.2	Fuerza requerida en el moldeo por inyección	508

CASOS DE ESTUDIO:

19.1	Paneles de polímero para carrocerías automotrices formados mediante diversos procesos	524
19.2	Fabricación de raquetas de tenis Head Protector®	525
19.3	Rotores de freno y camisas de cilindro hechos de material compósito con matriz metálica	527

- En este capítulo se describen los procesos de manufactura que intervienen en la producción de polímeros y materiales compósitos.
- La extrusión se utiliza de manera amplia para producir barras y tubos, así como pellet, que son el material base para la producción de piezas, láminas y películas de plástico.
- El capítulo describe diversas operaciones de moldeo para la producción de piezas discretas, incluyendo el moldeo por inyección y por inyección reacción, el moldeo por transferencia, el moldeo rotacional y el moldeo por compresión.
- Enseguida se describen los procesos de manufactura asociados con dar forma a los materiales compósitos, incluidos el moldeo por compresión y al vacío, el moldeo por contacto, la pultrusión y el devanado de filamentos.
- El capítulo termina con una descripción de las características de la maquinaria utilizada, los principios de diseño del molde y las consideraciones económicas para el procesamiento de polímeros.

Piezas típicas fabricadas: una amplia variedad de productos industriales y de consumo en toda una gama de colores y características.

Procesos alternativos: colado, formado, metalurgia de polvos y maquinado.

19.1 Introducción

El procesamiento de plásticos y elastómeros implica operaciones similares a las utilizadas en el formado de metales y en los procesos para darles forma, los cuales se describieron en capítulos anteriores. El procesamiento de hules y elastómeros se inició en el siglo XIX con el descubrimiento de la vulcanización por C. Goodyear en 1839. Los plásticos comenzaron a desarrollarse en la década de 1920, luego un rápido progreso a partir de la década de 1940 llevó a importantes avances en materiales, diseño y manufactura para hacer numerosos productos industriales y de consumo en grandes cantidades y a bajo costo. En la década de 1970 se comenzaron a introducir los plásticos reforzados, lo que abrió el camino para un rápido progreso en el uso de materiales compósitos, con propiedades y aplicaciones únicas, así como retos asociados con su producción.

Tal como señalamos en el capítulo 7, los termoplásticos se funden y los termofijos se curan a temperaturas relativamente bajas. Por lo tanto, a diferencia de los metales, son relativamente fáciles de manejar y requieren mucha menos fuerza y energía para ser procesados. En general, los plásticos se pueden moldear, fundir, formar y maquinar en formas complejas, usando pocas operaciones, con relativa facilidad y a altas tasas de producción (tabla 19.1). También se pueden unir mediante diversas técnicas (sección 32.6) y recubrirse por diversos procesos (capítulo 34). Los plásticos se forman en productos discretos o continuos como láminas, placas, barras y tubos que después pueden formarse

TABLA 19.1

Características generales de los procesos de formado y para dar forma a los plásticos y materiales compósitos	
Proceso	Características
Extrusión	Secciones transversales continuas, uniformemente sólidas o huecas y complejas; altas tasas de producción, costos de la herramienta relativamente bajos; amplias tolerancias.
Moldeo por inyección	Formas complejas de varios tamaños; paredes delgadas; tasas de producción muy altas; herramientas costosas; buena precisión dimensional.
Moldeo de espuma estructural	Piezas grandes con alta relación de rigidez a peso; herramientas menos caras que en el moldeo por inyección; tasas de producción bajas.
Moldeo por soplado	Piezas huecas, de pared delgada y botellas de diversos tamaños; altas tasas de producción, costos relativamente bajos de las herramientas.
Moldeo rotacional	Artículos grandes y huecos de formas relativamente simples; costos de la herramienta y tasas de producción relativamente bajos.
Termoformado	Cavidades poco profundas o relativamente profundas; bajos costos de la herramienta; tasas de producción medias.
Moldeo por compresión	Piezas similares al forjado por dado impresor; herramientas costosas; tasas de producción medias.
Moldeo por transferencia	Piezas más complejas que en el moldeo por compresión; mayores tasas de producción; altos costos de la herramienta; algunas pérdidas por desperdicio.
Colado	Formas simples o complejas hechas con moldes de bajo costo, rígidos o flexibles; bajas tasas de producción.
Procesamiento de materiales compósitos	Tiempos de ciclo largos; operación costosa; los costos de la herramienta dependen del proceso.

mediante procesos secundarios en toda una variedad de otros productos discretos. Los tipos y las propiedades de los polímeros, así como la forma y complejidad de las piezas que se pueden producir, se ven muy influidos por sus características de manufactura y procesamiento.

Por lo general, los plásticos se envían a las plantas de manufactura en forma de pellet, partículas o polvo, y se funden (para los termoplásticos) justo antes de que inicie el proceso para darles forma. También se utilizan plásticos líquidos que se curan en forma sólida, especialmente en la fabricación de plásticos termofijos y piezas reforzadas con plástico. Con el aumento de la conciencia en favor del medio ambiente, las materias primas también pueden consistir en plásticos remolidos, picados o derretidos que se obtienen en centros de reciclaje. Sin embargo, como podría esperarse, la calidad del producto puede no ser tan alta como cuando éste se hace a partir de materia virgen.

Siguiendo el esquema de la figura 19.1, en este capítulo se describen los procesos básicos, las operaciones, la maquinaria y la economía del formado de los plásticos y de los otros procesos empleados para darles forma. También se describen las técnicas de procesamiento de los plásticos reforzados y de los materiales compósitos de matriz metálica y cerámica. El capítulo comienza con las técnicas de procesamiento de masa fundida, empezando por la extrusión y continuando con los procesos de moldeo.

19.2 Extrusión

En la *extrusión*, que produce el mayor volumen de plásticos, las materias primas en forma de pellet, partículas o polvos termoplásticos se colocan en una tolva y se introducen en el barril de un *extrusor de tornillo* (figura 19.2). El barril está equipado con un tornillo helicoidal que desarrolla presión en el barril, mezcla los pellets y los transporta hacia abajo del barril hacia el dado. Los calentadores del barril y la fricción interna creada por la acción mecánica del tornillo calientan y licúan los pellets.

Los tornillos tienen tres secciones distintas:

1. *Sección de alimentación*: transporta el material desde la tolva hasta la región central del barril.

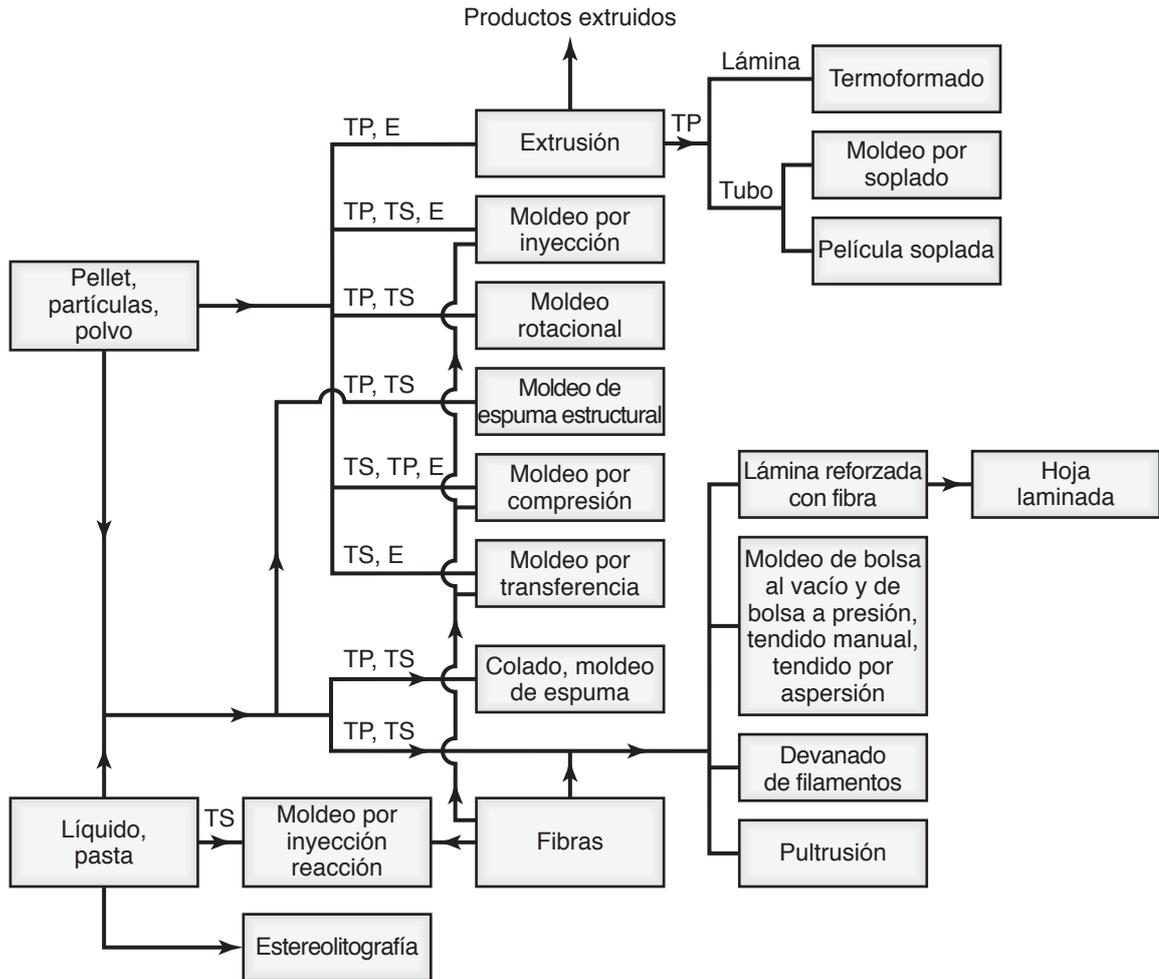


FIGURA 19.1 Esquema de los procesos de formado y de otros para dar forma a los plásticos, elastómeros y materiales compósitos. (TP significa termoplástico; TS, termofijo y E, elastómero).

2. *Sección de fusión*, también llamada *sección de compresión* o *transición*: donde el calor generado por el cizallamiento viscoso de los pellets plásticos y por los calentadores externos ubicados alrededor del barril causan el inicio de la fusión.
3. *Sección de medición* o de *bombeo* (o de *plastificación*): donde se producen cortes y fusiones adicionales con la elevación de la presión a la entrada del dado.

Las longitudes de estas secciones individuales se pueden cambiar para adaptarse a las características de fusión de diferentes tipos de plásticos. Por lo general, se coloca un filtro de criba (figura 19.2a), justo antes de la boquilla, para filtrar la resina sin fundir o congelada. Este filtro, que se sustituye periódicamente, causa también una contrapresión en el barril que debe ser superada por el tornillo extrusor. Entre el filtro de criba y el dado está una *placa rompedora* que tiene varios orificios pequeños y ayuda a mejorar la mezcla del polímero antes de su entrada en el dado. El producto extruido se enfría, generalmente por exposición a aire soplado o al hacerlo pasar a través de un canal lleno de agua (conducto).

El control de la velocidad y la uniformidad de enfriamiento son importantes en la extrusión con el fin de minimizar la contracción y la distorsión del producto. Además de los extrusores con un solo tornillo, otros diseños incluyen *doble tornillo* (dos tornillos paralelos entre sí) y *múltiples tornillos* para los polímeros que son difíciles de extruir (vea también *tornillo alternante*, sección 19.3).

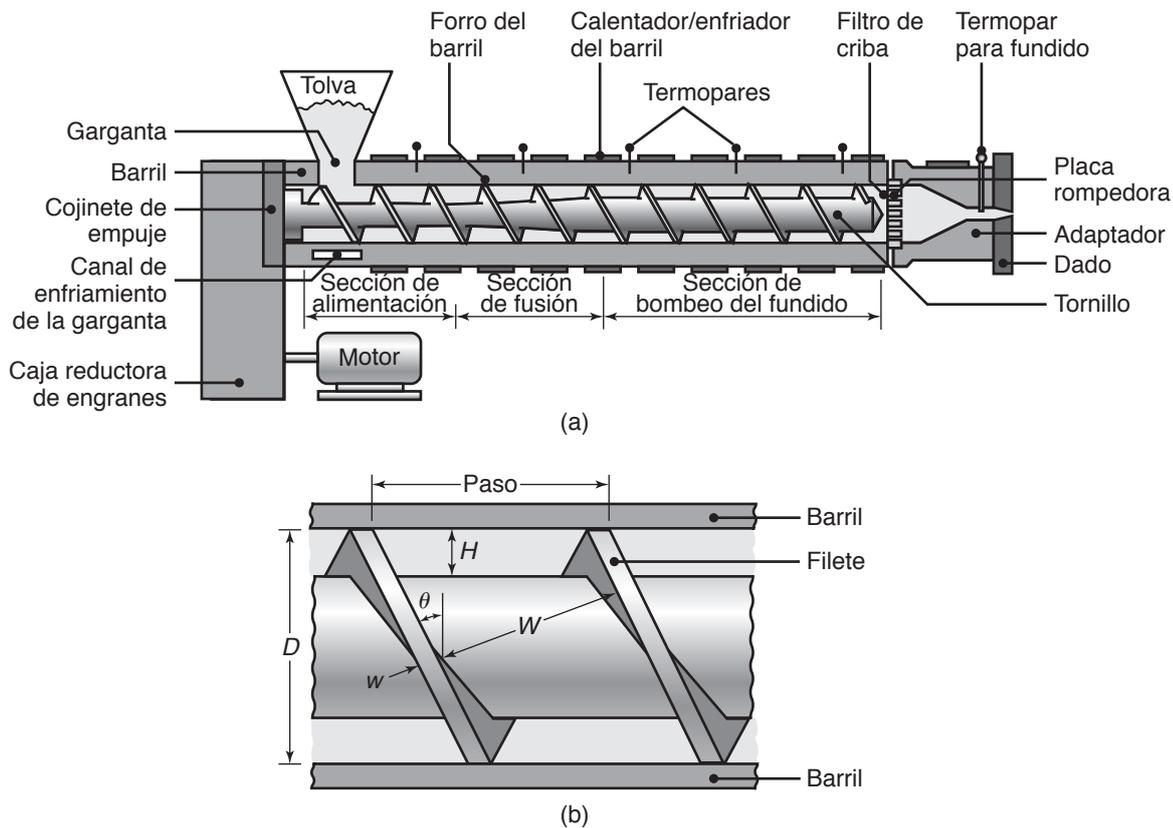


FIGURA 19.2 (a) Representación esquemática de un tornillo extrusor típico. (b) Geometría de un tornillo extrusor. Las formas complejas se pueden extruir con dados relativamente simples y de bajo costo.

En la figura 19.2b se muestra un tornillo helicoidal típico y se indican los parámetros más importantes que afectan la mecánica de la extrusión de polímeros. En cualquier punto en el tiempo, el plástico fundido tiene la forma de una cinta helicoidal, con espesor H y anchura W , y es llevado hacia la salida extrusora por los filetes del tornillo *giratorio*. La forma, el paso y el ángulo del filete del tornillo helicoidal son parámetros importantes ya que afectan el flujo del polímero a través del extrusor. La relación de la longitud del barril, L , sobre su diámetro, D , también es importante. En los extrusores comerciales típicos, la relación L/D oscila desde 5 hasta 30 y los diámetros del barril suelen variar entre 25 y 200 mm (1 y 8 pulg).

Características del proceso. Debido a que existe un suministro continuo de materia prima desde la tolva, es posible extruir productos largos como barras sólidas, secciones, canales, láminas, tubos, tuberías y componentes arquitectónicos de forma continua. También es posible extruir secciones transversales con formas complejas constantes usando herramientas relativamente baratas. En la figura 19.3b se muestran algunos perfiles comunes de dados. Por lo general, los polímeros experimentan una recuperación de forma mucho más grande e irregular que lo que puede encontrarse en la extrusión de metales. Puesto que el polímero se *hincha* a la salida del molde, las aberturas mostradas en las figuras 19.3b y c son más pequeñas que las secciones transversales extruidas. Después de enfriarse, el producto extruido se puede estirar (*dimensionar*) mediante un jalador y enrollarse o cortarse a las longitudes deseadas.

El control de los parámetros de procesamiento, como la velocidad de rotación del tornillo extrusor, las temperaturas de la pared del barril, el diseño del dado y la rapidez de enfriamiento, así como las velocidades de estirado, es importante para garantizar la integridad del producto y la precisión dimensional uniforme. Los *defectos* observados en la

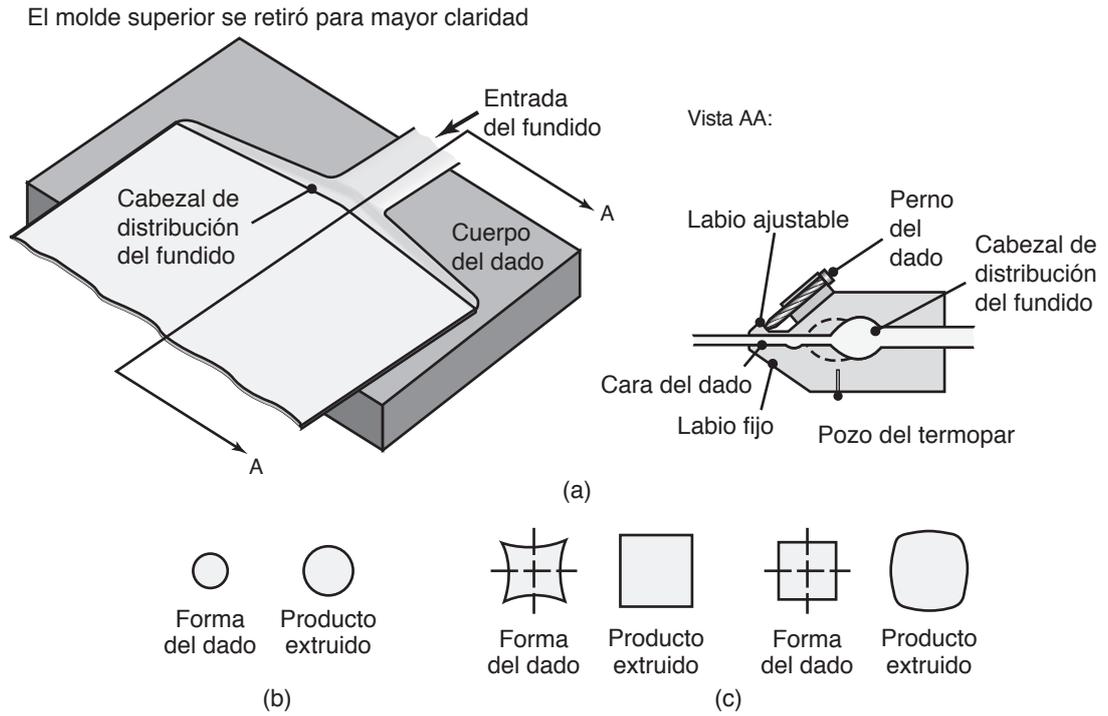


FIGURA 19.3 Geometrías comunes del dado de extrusión: (a) dado de percha recubierta para la extrusión de láminas; (b) dado redondo para la producción de varillas; (c) y (d) recuperación no uniforme de la pieza después de salir del dado.

extrusión de plásticos son similares a los observados en la extrusión de metales, descritos en la sección 15.5. La forma del dado es importante porque puede inducir altos esfuerzos en el producto haciendo que se desarrollen fracturas superficiales, como también ocurre con los metales. Otros defectos superficiales son el *defecto bambú* y la *piel de tiburón*, los cuales se deben a una combinación de la fricción en las interfases del dado y el polímero, a la recuperación elástica y a la deformación no uniforme de las capas externas del producto con respecto a su volumen durante la extrusión.

Por lo general, los extrusores se clasifican por el diámetro, D , del barril y la relación de longitud a diámetro (L/D) del barril. Los costos de la maquinaria pueden ser del orden de 300 000 dólares estadounidenses, incluyendo el costo de los equipos para el enfriamiento y el devanado posterior del producto extruido.

19.2.1 Procesos de extrusión diversos

Existen diversas variaciones del proceso básico de extrusión para producir una cantidad de diferentes productos hechos con polímeros.

Tubos y tuberías plásticos. Se producen en un extrusor con *dado de araña*, como se muestra en la figura 19.4a (vea también la figura 15.8 para mayores detalles). En esta operación, también es posible suministrar refuerzos de fibra o alambre tejidos a través de dados especialmente diseñados para la manufactura de productos reforzados que resisten presiones más altas, como las mangueras de jardín. La extrusión de tubos también representa un primer paso para otros procesos relacionados, como el moldeo por extrusión soplado y la película soplada.

Tubería plástica rígida. Extruida mediante un proceso en el que el dado se *gira*, la tubería plástica rígida causa que el polímero sea cizallado y se oriente biaxialmente durante la extrusión. En consecuencia, el tubo adquiere una resistencia más grande al aplastamiento y mayor relación de resistencia a peso que el tubo extruido en forma convencional.

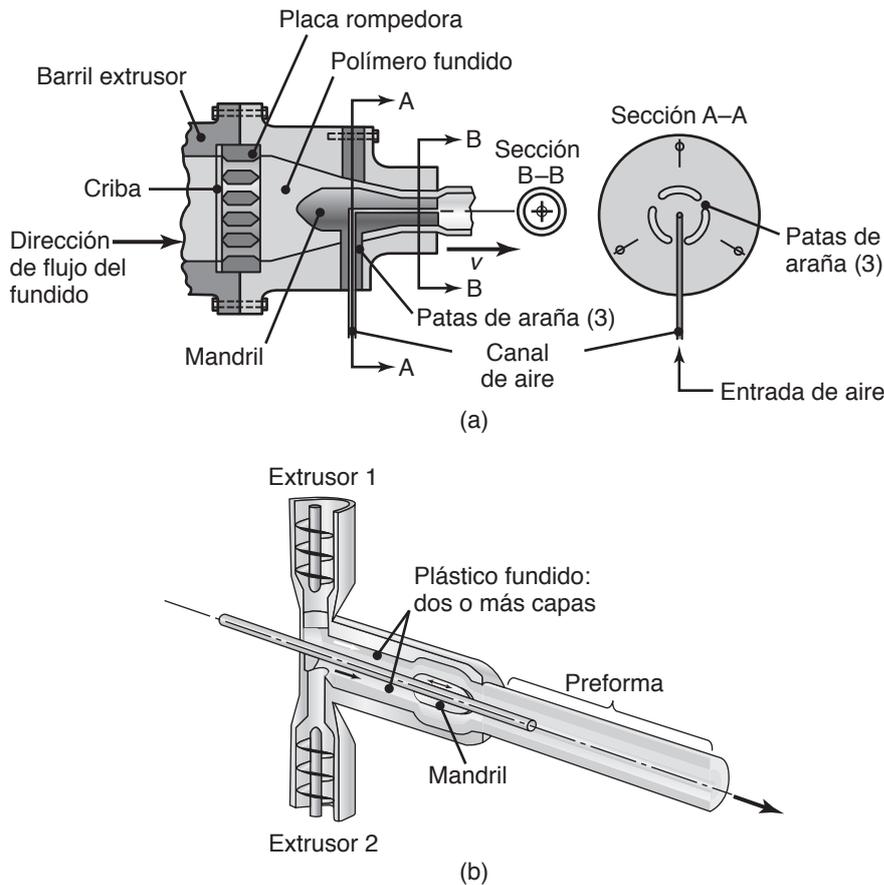


FIGURA 19.4 Extrusión de tubos. (a) Extrusión utilizando un dado de araña (vea también la figura 15.8) y aire a presión. (b) Coextrusión para producir una preforma para una botella de plástico.

Coextrusión. Como se muestra en la figura 19.4b, la coextrusión implica la extrusión simultánea de dos o más polímeros a través de un solo dado, por lo que la sección transversal del producto contiene diferentes polímeros, cada uno con sus propias características y funciones. Por lo general, la coextrusión se realiza en formas tales como láminas planas, películas y tubos, y se utiliza especialmente en el envasado de alimentos donde las diferentes capas de polímeros cumplen diferentes funciones. Éstas son: (a) proporcionar inertidad a los alimentos, (b) servir de barrera contra fluidos, como agua o aceite, y (c) etiquetar el producto.

Alambre eléctrico forrado de plástico. El alambre, el cable y las tiras eléctricas se extruyen y forran con plástico de manera simultánea. El alambre se introduce en la abertura del dado, a una velocidad controlada con el plástico extruido, para obtener un forro uniforme sobre el alambre. Para garantizar el aislamiento adecuado, a los alambres eléctricos extruidos se les prueba continuamente su resistencia eléctrica a medida que salen del dado, el alambre también se marca con tinta mediante un rodillo para identificar el tipo específico. Los *clips para papel* hechos de alambre y forrados con plástico también se fabrican mediante este proceso de forrado.

Láminas y películas de polímero. Es posible producir láminas y películas mediante el uso de un dado de extrusión plano diseñado especialmente, como el que se muestra en la figura 19.3a. También conocido como *dado de percha recubierta*, está diseñado para distribuir el polímero fundido de manera uniforme en todo el ancho de la abertura del dado. El polímero se extruye forzándolo a través del dado, luego de lo cual la lámina

extruida se trabaja con rodillos, primero en rodillos enfriados por agua (para enfriar las láminas) y después en un par de rodillos de tracción recubiertos de hule. Por lo general, se considera que las *láminas* de polímero son más gruesas que 0.5 mm y que las *películas* son más delgadas que 0.5 mm.

Películas poliméricas delgadas. Las *bolsas de plástico* comunes y otros productos de película polimérica delgada están hechos a partir de película soplada, que a su vez se fabrica a partir de un tubo de pared delgada producido por un extrusor. En este proceso, un tubo se extruye verticalmente (figura 19.5), se estira de manera continua y se expande en forma de globo mediante el soplado de aire a través del centro del dado extrusor hasta que se alcanza el espesor de película deseado. Debido a la orientación molecular de los termoplásticos (sección 7.3), en el globo se desarrolla una *línea de congelación* que reduce su transparencia.

Por lo general, el globo se enfría mediante aire proveniente de un anillo de enfriamiento situado a su alrededor, el anillo también puede actuar como una barrera física a la expansión más diametral del globo, controlando así sus dimensiones. Enseguida, la burbuja enfriada se corta longitudinalmente, convirtiéndose en *película de envoltura*, o se sujeta/suelda y corta, convirtiéndose en una bolsa de plástico. El ancho de la película producida después del corte puede ser del orden de 6 m (20 pies) o más.

La relación del diámetro de soplado al diámetro del tubo extruido se denomina *relación de soplado*, que es de alrededor de 3:1 en la figura 19.5. Note que, tal como se describe en la sección 2.2.7, el polímero debe tener un alto exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación, m , para ser soplado con éxito mediante este proceso sin que se rompa (vea también el ejemplo 9.1).

Películas plásticas. Las películas plásticas, especialmente el politetrafluoroetileno (PTFE; nombre comercial: *teflón*), pueden producirse mediante el *rasurado* de la circunferencia de una palanquilla redonda sólida de plástico, lo cual se hace con cuchillas diseñadas especialmente y de una manera similar a la producción de chapa de madera a partir de una gran pieza redonda de madera, en un proceso llamado *rasurado* (vea también la sección 24.4).

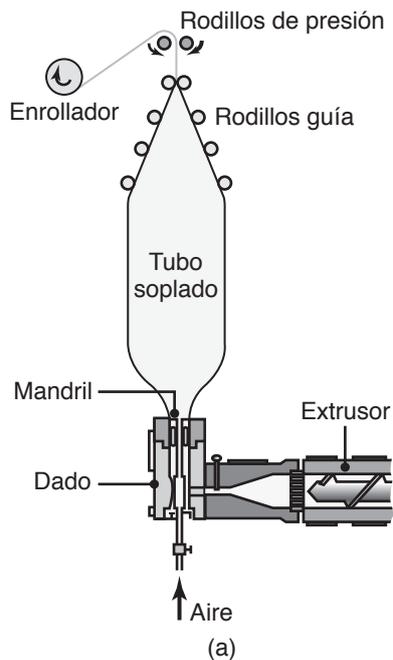


FIGURA 19.5 (a) Ilustración esquemática de la producción de películas delgadas y bolsas de plástico a partir de un tubo, fabricadas usando primero un extrusor y después el soplado por aire. (b) Operación de película soplada; este proceso está bien desarrollado y produce cantidades muy grandes de películas de plástico y bolsas de supermercado a bajo costo. Fuente: (b) Cortesía de Windmoeller & Hoelscher Corp.

Pellet. Los pellet se fabrican también por extrusión y se utilizan como materia prima en otros métodos de procesamiento de plásticos que se describen en este capítulo. Una barra sólida de diámetro pequeño se extruye continuamente y después se corta en longitudes pequeñas (pellet). Con algunas modificaciones, los extrusores también pueden utilizarse como máquinas para fundir en otros procesos para dar forma, como el moldeo por inyección y el moldeo por soplado.

EJEMPLO 19.1 Película soplada

Dado: Una bolsa de plástico típica hecha por película soplada tiene una dimensión lateral (anchura) de 400 mm.

Se solicita: a. Determinar el diámetro del dado extrusor. b. Estas bolsas son relativamente resistentes, ¿cómo se logra esta resistencia?

Respuesta:

- a. El perímetro de la bolsa plana es $(2)(400) = 800$ mm. Como la sección transversal original de la película es redonda, el diámetro soplado debe ser $\pi D = 800$; por lo tanto, $D = 255$ mm. Re-

cuerde que, en este proceso, un tubo se expande de 1.5 a 2.5 veces el diámetro del dado extrusor. Tomando el valor máximo de 2.5, el diámetro del dado es $255/2.5 = 100$ mm.

- b. Observe en la figura 19.5a que, después de la extrusión, el globo se jala hacia arriba mediante los rodillos de sujeción. Por lo tanto, además del *estiramiento* diametral y de la *orientación* molecular consiguiente, la película se estira y orienta en la dirección longitudinal. La orientación biaxial resultante de las moléculas de polímero mejoran significativamente la resistencia y la tenacidad de la bolsa de plástico.

19.2.2 Producción de fibras poliméricas de refuerzo

Las fibras de polímero tienen numerosas aplicaciones importantes. Además de su uso como refuerzo en materiales compósitos, estas fibras se utilizan en una amplia variedad de productos industriales y de consumo, incluyendo prendas de vestir, alfombras, telas, cuerdas y cinta de embalaje.

La mayoría de las fibras sintéticas utilizadas en los plásticos reforzados son polímeros, los cuales son extruidos a través de pequeños orificios de un dispositivo llamado *hilador* (se asemeja al cabezal de una regadera) para formar filamentos continuos de polímero semisólido. El extrusor fuerza al polímero a través del hilador, que puede tener desde uno hasta varios cientos de orificios. Si los polímeros son termoplásticos, primero se funden en el extrusor, como se describe en la sección 19.2. Los polímeros termofijos también pueden formarse como fibras; para ello, primero se disuelven o se tratan químicamente de modo que puedan extruirse. Estas operaciones se realizan a altas tasas de producción y son de gran confiabilidad.

A medida que los filamentos emergen de los orificios del hilador, el polímero líquido toma primero un estado gomoso y luego se solidifica. Este proceso de extrusión y solidificación de filamentos continuos se denomina *hilado*, un término que también se utiliza para la producción de textiles naturales como algodón o lana. Existen cuatro métodos para el hilado de fibras: por fusión, en húmedo, en seco y en gel.

1. En el **hilado por fusión** (figura 19.6), el polímero fundido se extruye a través del hilador y enseguida se solidifica directamente por enfriamiento. Un hilador típico para esta operación tiene alrededor de 5 mm (0.2 pulg) de espesor y 50 orificios

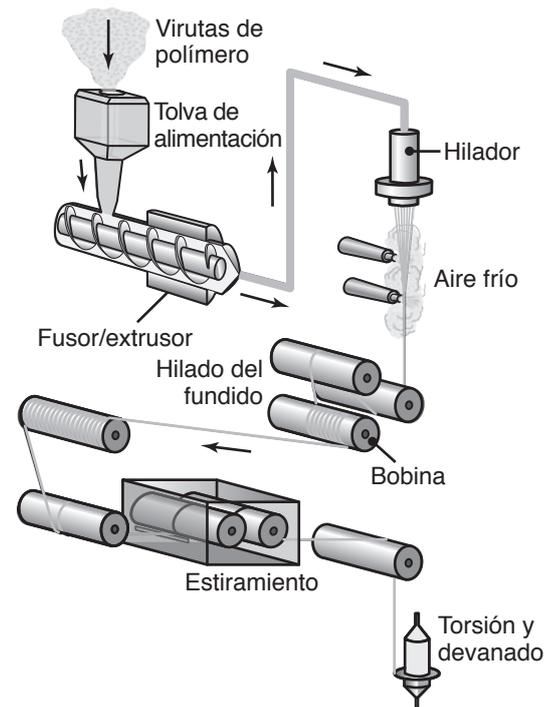


FIGURA 19.6 Proceso de hilado de un fundido para la producción de fibras poliméricas que se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo tejidos y refuerzos para materiales compósitos; en la caja de estiramiento, el rodillo derecho gira más rápido que el rodillo izquierdo.

con diámetro aproximado de 0.25 mm (0.01 pulg.). Las fibras que salen de la boquilla del hilador se enfrían por convección de aire forzado y al mismo tiempo se jalan, de modo que su diámetro final es mucho más pequeño que la abertura del hilador. Polímeros como el nailon, las olefinas, el poliéster y el PVC se producen de esta manera.

Las fibras hiladas por fusión también se pueden extruir desde el hilador en otras diversas secciones transversales, como en las formas trilobular (un triángulo con lados curvos), pentagonal, octagonal y hueca. Las fibras huecas atrapan aire, con lo que proporcionan un aislamiento térmico adicional.

2. El **hilado en húmedo** es el proceso más antiguo de producción de fibras, se utiliza para los polímeros que han sido disueltos en un solvente al sumergir los hiladores en un baño químico. A medida que los filamentos emergen, se precipitan en el baño produciendo una fibra que después se enrolla en una *bobina (carrete)*. El término “húmedo” se refiere a la utilización de un baño líquido precipitante que da como resultado fibras húmedas; éstas requieren un secado antes de poder ser utilizadas. Mediante este proceso, se produce acrílico, rayón y fibras de aramida.
3. El **hilado en seco** se utiliza para los materiales termofijos que se disuelven mediante un fluido. En lugar de precipitar el polímero por dilución, como en el hilado en húmedo, la solidificación se logra mediante la evaporación del solvente en una corriente de aire o gas inerte. Por lo tanto, los filamentos no entran en contacto con un líquido precipitante, eliminando así la necesidad del secado. El hilado en seco se utiliza para la producción de acetatos, triacetatos, elastanos a base de poliéster y fibras acrílicas.
4. El **hilado en gel** es un proceso especial que se utiliza para obtener alta resistencia o propiedades especiales en las fibras. Algunas fibras de polietileno y de aramida se producen por hilado en gel. El polímero no se funde completamente, ni se disuelve en un líquido, pero las moléculas se unen entre sí en varios puntos en forma de cristal líquido. Esta operación produce grandes fuerzas entre las cadenas de los filamentos resultantes, las cuales pueden aumentar significativamente la resistencia a la tensión de las fibras. Por otra parte, los cristales líquidos se alinean a lo largo del eje de la fibra debido a la deformación producida durante la extrusión. Por lo tanto, los filamentos salen del hilador con un grado inusualmente alto de orientación entre sí, mejorando aún más su resistencia. Este proceso también se denomina *hilado en húmedo seco* porque los filamentos pasan primero por aire y luego se enfrían más en un baño líquido.

Un paso necesario en la producción de la mayoría de las fibras es la aplicación de un *estiramiento* significativo para inducir la orientación de las moléculas de polímero en la dirección de la fibra. Esta orientación es la principal razón para la alta resistencia de las fibras, en comparación con el polímero en forma volumétrica. El estiramiento puede hacerse mientras el polímero todavía es flexible (justo después de la extrusión desde el hilador) o como una operación de estirado en frío. La tensión inducida puede llegar a ser hasta de 800 por ciento.

Las **fibras de grafito** se fabrican a partir de fibras de polímero mediante *pirólisis*. En esta operación se aplica calor controlado, dentro del rango de 1500 a 3000 °C (2730 a 5400 °F), a la fibra de polímero (normalmente poliacrilonitrilo, PAN) para expulsar todos los elementos excepto el carbono. La fibra se encuentra bajo tensión para que desarrolle un alto grado de orientación en la estructura de fibra resultante (vea también la sección 9.2.1 sobre las propiedades de las fibras de grafito y otros detalles).

19.3 Moldeo por inyección

El *moldeo por inyección* es similar a la fundición por inyección en molde de cámara caliente (figura 19.7; vea también la sección 11.4.5). Los pellet se introducen en el cilindro calentado y el polímero plastificado es forzado a entrar al molde, ya sea mediante

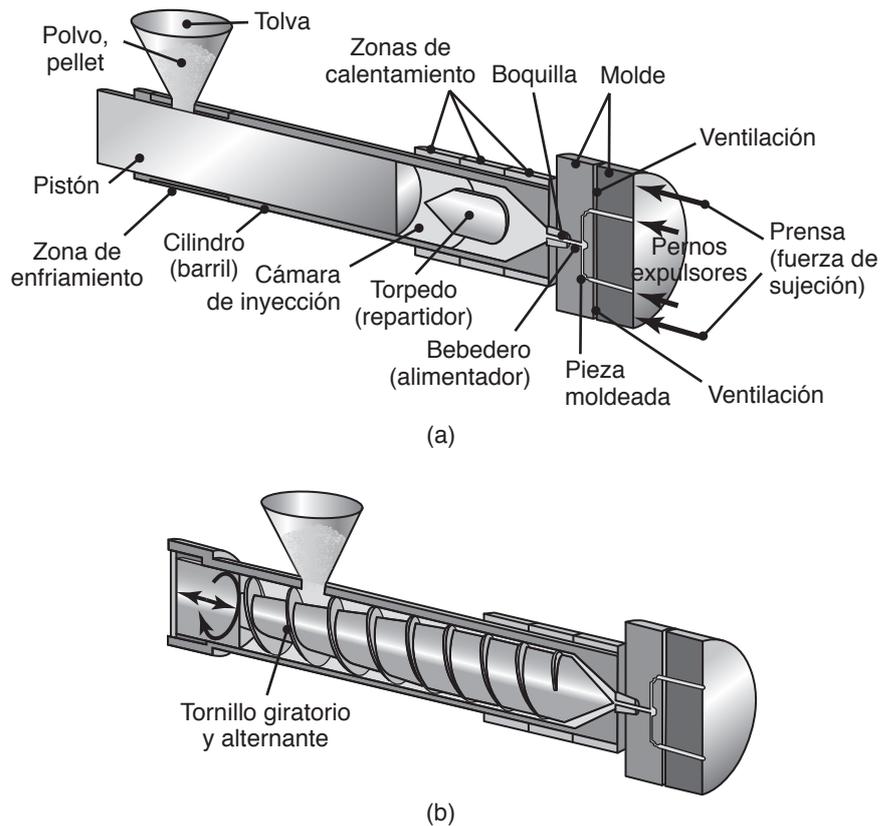


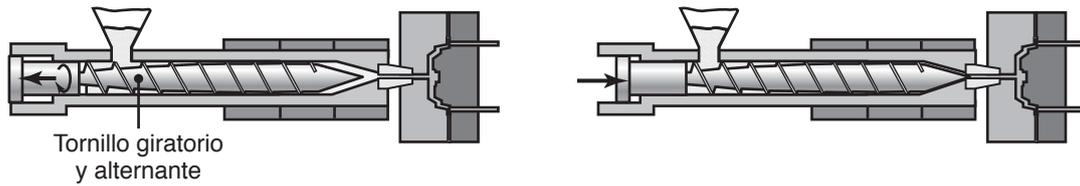
FIGURA 19.7 Ilustración esquemática del moldeo por inyección con (a) un émbolo y (b) un tornillo giratorio y alternante.

un *émbolo* hidráulico o por el sistema de *tornillo giratorio* de un extrusor. Tal como en la extrusión de plástico, el barril (cilindro) se calienta externamente para promover la fusión del polímero. Sin embargo, en las máquinas de moldeo por inyección, una porción mucho más grande del calor transferido al polímero se debe al calentamiento por fricción.

Las máquinas modernas son del tipo *tornillo alternante* o *plastificante* (figura 19.7b), con la secuencia de operaciones que se muestran en la figura 19.8. A medida que la presión se acumula en la entrada del molde, el tornillo giratorio comienza a moverse hacia atrás bajo presión hasta una distancia predeterminada. Este movimiento controla el volumen de material a inyectar. Después, el tornillo deja de girar y se empuja hacia adelante en forma hidráulica, forzando el plástico fundido a entrar en la cavidad del molde. Por lo general, las presiones desarrolladas están entre 70 y 200 MPa (10 000 y 30 000 psi).

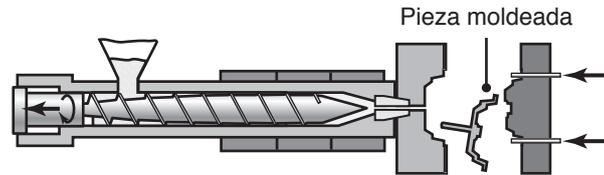
En la figura 19.9 se muestran algunos productos moldeados por inyección; otros productos incluyen tazas, contenedores, carcasas, mangos de herramienta, perillas, juguetes, accesorios de plomería y componentes para equipo eléctrico y de comunicación. Para los termoplásticos, los moldes se mantienen relativamente fríos, a unos 90 °C (190 °F). Las piezas termofijas se moldean en moldes calentados, a unos 200 °C (400 °F), donde ocurre la *polimerización* y el *enlazamiento cruzado*.

Después de que la pieza se ha enfriado (para los termoplásticos) o curado (para los termofijos) lo suficiente, se abren los moldes y la pieza es expulsada. Los moldes se cierran de nuevo y automáticamente se repite el proceso. Debido a que el material está fundido cuando se inyecta en el molde, es posible obtener formas complejas con buena precisión dimensional. Sin embargo, a causa del enfriamiento irregular de la pieza en el molde, se desarrollan esfuerzos residuales. Mediante estos procesos, también pueden moldearse elastómeros por inyección en productos discretos.



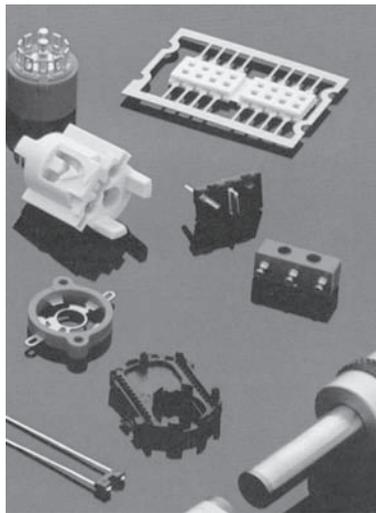
1. Acumulación de polímero frente al buje del bebedero; la presión empuja el tornillo hacia atrás. Cuando se ha acumulado suficiente polímero, la rotación se detiene.

2. Cuando el molde está listo, el tornillo es empujado hacia adelante por medio de un cilindro hidráulico, llenando así el buje del bebedero, el bebedero y la cavidad del molde con el polímero. El tornillo empieza a girar de nuevo para acumular más polímero.



3. Después de la solidificación/curado del polímero, se abre el molde y los expulsores retiran la pieza moldeada.

FIGURA 19.8 Secuencia de operaciones en el moldeo por inyección de una pieza con un tornillo alternante; este proceso se utiliza ampliamente para numerosos productos comerciales y de consumo como juguetes, contenedores, perillas y equipos eléctricos (vea la figura 19.9).



(a)



(b)

FIGURA 19.9 Productos típicos fabricados mediante moldeo por inyección, incluyendo ejemplos de moldeo con insertos. Fuente: (a) Cortesía de Plainfield Molding, Inc. (b) Cortesía de Rayco Mold y Mfg. LLC.

En el moldeo por inyección también se utilizan moldes con mandriles móviles y sin atornillar, puesto que permiten el moldeo de piezas con cavidades múltiples o elementos roscados internos y externos. Para ajustarse al diseño de la pieza, los moldes pueden tener diversos componentes (figura 19.10), incluyendo canales de alimentación (como los utilizados en la fundición de metales en molde), corazones, cavidades, canales de enfriamiento, insertos, pernos de expulsión y eyectores. Existen tres tipos básicos de moldes para el moldeo por inyección:

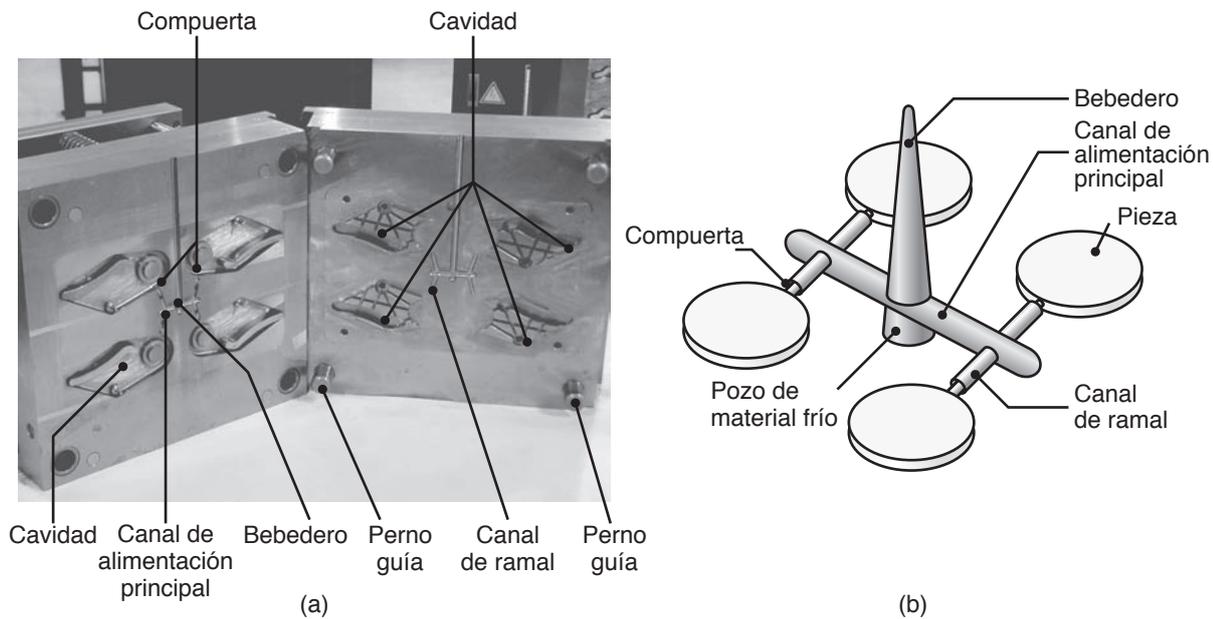


FIGURA 19.10 Ilustración de los componentes del molde para el moldeo por inyección. (a) Molde de dos placas con la identificación de los elementos más importantes. (b) Ilustración esquemática de los componentes de un molde. *Fuente:* Cortesía de Tooling Molds West, Inc.

1. **Molde de dos placas de canal frío:** este diseño es el más simple y común (figura 19.11a).
2. **Molde de tres placas de canal frío:** el sistema de canal de alimentación se separa de la pieza al abrirse el molde (figura 19.11b).
3. **Molde de canal caliente, llamado también molde sin canal:** el plástico fundido se mantiene caliente en una placa de canales de alimentación calientes (figura 19.11c).

En moldes de canal frío, se debe retirar el plástico solidificado que queda en los canales de alimentación desde la cavidad del molde hasta el extremo del barril, por lo general, recortándolo, este desecho puede trozarse y reciclarse después. En los moldes de canal caliente, que son más caros, no hay compuertas, canales de alimentación o bebederos unidos a la pieza moldeada. Los tiempos de ciclo de producción son más cortos porque sólo debe esperarse a que la pieza moldeada se enfríe para poderla expulsar.

Moldeo por inyección de multicomponentes. También llamado *coinyección* o *moldeo sándwich*, este proceso permite la formación de piezas que tienen una combinación de varios colores y formas. Un ejemplo es el moldeo de cubiertas para las luces traseras de un automóvil (calaveras automotrices), las cuales se hacen a partir de diferentes materiales y en colores, como rojo, ámbar y blanco. Para algunas piezas, también se puede colocar una película impresa en la cavidad del molde, por lo que no necesitan ser decoradas o marcadas después del moldeo.

El **moldeo con insertos** involucra componentes metálicos (como tornillos, pernos y tiras) que se colocan en la cavidad del molde antes de la inyección y se convierten en parte integral del producto moldeado (figura 19.9). Los ejemplos más comunes de tales combinaciones son herramientas manuales en las que el mango se moldea con la inserción de un componente metálico; otros ejemplos incluyen componentes eléctricos y automotrices y piezas de grifo.

Sobremoldeo. Éste es un proceso para la manufactura de productos como juntas de bisagra y juntas de bola y cuenca en una sola operación, los cuales no requieren un ensamble posterior al moldeo. Por lo general, se utilizan dos plásticos diferentes para asegurar que no se peguen las mitades moldeadas de la junta, de lo contrario el movimiento se vería obstaculizado.

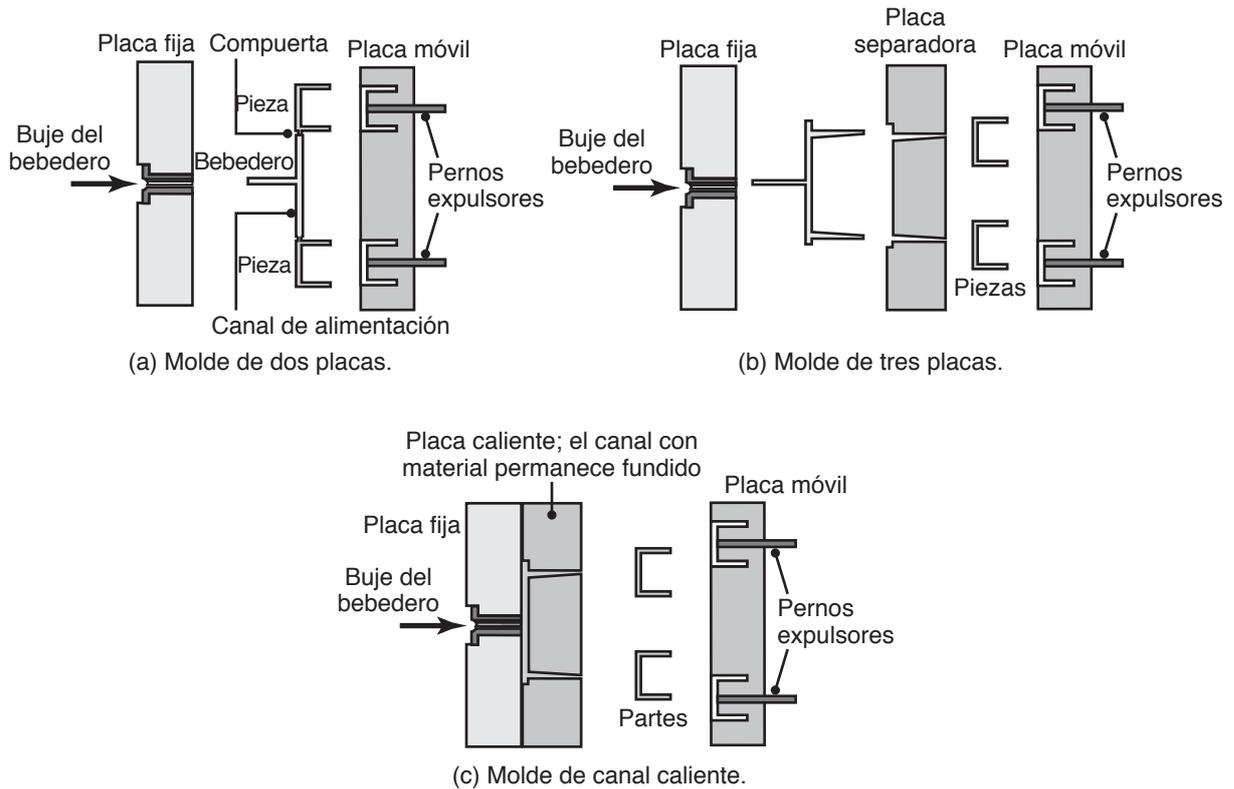


FIGURA 19.11 Tipos de moldes utilizados en el moldeo por inyección.

En el **moldeo en hielo**, se utiliza el mismo tipo de plástico para ambos componentes de la junta. La operación se lleva a cabo en una máquina de moldeo por inyección convencional y en un ciclo. Se utiliza un molde de dos cavidades con insertos de enfriamiento situados en la zona de contacto entre el primero y segundo componentes moldeados de la junta. De esta manera, no se pegan las dos piezas conservando el movimiento libre, como en una bisagra o un mecanismo de deslizamiento.

Capacidades del proceso. El moldeo por inyección es un proceso de producción a alta velocidad y permite un buen control dimensional. Aunque generalmente la mayoría de las piezas pesan entre 100 y 600 g (3 y 20 oz), también pueden ser mucho más pesadas, como las molduras de carrocería y los componentes exteriores de un automóvil. Los tiempos de ciclo típicos varían de 5 a 60 segundos, aunque pueden ser de varios minutos para los materiales termofijos.

El moldeo por inyección es un proceso versátil y capaz de producir formas complejas con buena precisión dimensional. Así como en otros procesos de formado, el diseño del molde y el control del flujo de material en las cavidades del molde son factores importantes en la calidad del producto y, por lo tanto, para evitar defectos. Debido a las similitudes básicas con la fundición de metales en lo relativo al flujo de material y a la transferencia de calor, los *defectos* observados en el moldeo por inyección son similares a los de la fundición. Por ejemplo:

- En la figura 10.13g, el metal fundido fluye desde dos canales de alimentación opuestos que luego se encuentran en el centro de la cavidad del molde. Por lo tanto, una junta en la fundición es equivalente a las *líneas de soldadura* en el moldeo por inyección.
- Si las secciones transversales de los canales de alimentación son demasiado pequeñas, el polímero puede solidificarse antes de tiempo impidiendo el llenado completo de la cavidad del molde. La solidificación de las capas exteriores en secciones grue-

sas puede provocar *porosidad* o *huecos* debido a la contracción, como en las piezas de metal que se muestran en la figura 12.2.

- Si, por alguna razón, los moldes no cierran completamente o presentan desgaste, se formará una *rebaba*, de manera similar a la formación de rebabas en el forjado con dado impresor (vea las figuras 14.6 y 19.17c).
- En las piezas moldeadas por inyección también se observa un defecto conocido como *marcas de hundimiento* (o *jalones*) —como los rechupes y contracciones en los metales—, similar al que se muestra en la figura 19.32c.
- Los métodos para evitar defectos consisten en un control adecuado de las temperaturas, presiones y modificaciones en el diseño del molde utilizando software de simulación.

En la actualidad continúan desarrollándose *técnicas de modelado* y *software de simulación* para efectuar el estudio de los sistemas óptimos de alimentación, llenado y enfriamiento del molde, así como la distorsión de las piezas. Ya existen *programas de software* que agilizan el proceso de diseño para el moldeo de piezas con buenas dimensiones y características. Los programas toman en cuenta factores como la presión de inyección, la temperatura, la transferencia de calor y la condición del polímero.

Máquinas. Las máquinas de moldeo por inyección suelen ser horizontales (figura 19.12); las máquinas verticales se utilizan para fabricar piezas pequeñas con tolerancias estrictas y para el moldeo con insertos. La fuerza de cierre de los moldes se suministra normalmente por medios hidráulicos, aunque también se usan medios eléctricos (pesan menos y son más silenciosos que las máquinas hidráulicas). Las máquinas modernas están equipadas con microprocesadores en un panel de control y monitorean todos los aspectos de la operación de moldeo.

Las máquinas de moldeo por inyección se clasifican de acuerdo con la capacidad del molde y la fuerza de cierre. En la mayoría de las máquinas, esta fuerza varía desde 0.9 hasta 2.2 MN (100 a 250 ton). La máquina más grande que actualmente está en operación tiene una capacidad de 45 MN (5000 ton) y puede producir piezas con peso de 25 kg (55 lb). El costo de una máquina de 100 toneladas oscila entre \$60 000 y \$90 000 y el de una máquina de 300 toneladas desde alrededor de \$85 000 hasta cerca de \$140 000.

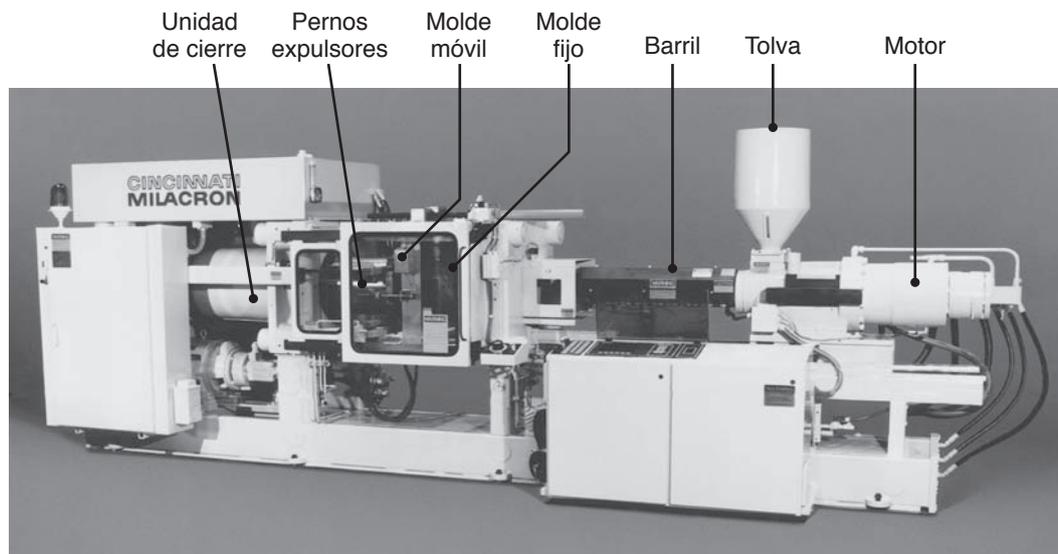


FIGURA 19.12 Máquina de moldeo por inyección de 2.2 MN (250 ton); el tonelaje es la fuerza aplicada para mantener los moldes cerrados durante la inyección del plástico fundido en las cavidades del molde y conservarlos así hasta que las piezas estén lo suficientemente frías y rígidas como para ser retiradas del molde. *Fuente:* Cortesía de Cincinnati Milacron, Plastics Machinery Division.

Los costos de los moldes suelen oscilar entre \$20 000 y \$200 000. En consecuencia, la producción de alto volumen resulta esencial para justificar un costo tan alto.

Por lo general, los moldes están hechos de acero para herramienta, cobre berilio o aluminio. Pueden tener múltiples cavidades, de modo que se pueda moldear más de una pieza en un ciclo (vea también la figura 11.22). Los moldes grandes pueden costar hasta \$100 000. La vida del molde puede ser de hasta dos millones de ciclos para los moldes de acero, pero puede ser de sólo 10 000 ciclos para moldes de aluminio.

EJEMPLO 19.2 Fuerza requerida en el moldeo por inyección

Dado: Se va a utilizar una máquina de moldeo por inyección de 250 ton para hacer engranes rectos de 4.5 pulg de diámetro y 0.5 pulg de espesor. Los engranes tienen un perfil de diente fino.

Se solicita: ¿Cuántos engranes pueden moldearse por inyección en un juego de moldes? ¿El espesor de los engranes afecta la fuerza?

Respuesta: Debido a los detalles involucrados (dientes de engrane finos), se supone que la presión requerida en la cavidad del molde será del orden de 100 MPa (15 ksi). El área de la sección transversal (proyectada)

del engrane es $\pi(4.5)^2/4 = 15.9$ pulg². Suponiendo que el plano de partición de las dos mitades del molde está en el plano medio del engrane, la fuerza requerida es $(15.9)(15\ 000) = 238\ 500$ libras.

Como la capacidad de la máquina es de 250 ton, la fuerza de cierre disponible es $(250)(2000) = 500\ 000$ lb. Por lo tanto, el molde puede contener dos cavidades y producir dos engranes por ciclo. Debido a que no influye en el área de la sección transversal del engrane, su espesor no afecta directamente a las presiones implicadas y, por lo tanto, la respuesta no cambia.

19.3.1 Moldeo por inyección reacción

En el proceso de *moldeo por inyección reacción* (RIM, por sus siglas en inglés), un monómero (sección 7.2) y dos o más reactivos líquidos son forzados a entrar, a alta velocidad, en una cámara mezcladora a una presión de entre 10 y 20 MPa (1400 y 2800 psi) y, después, en la cavidad del molde (figura 19.13). En el molde, rápidamente se presentan reacciones químicas y el polímero se solidifica. Los polímeros usados de manera típica

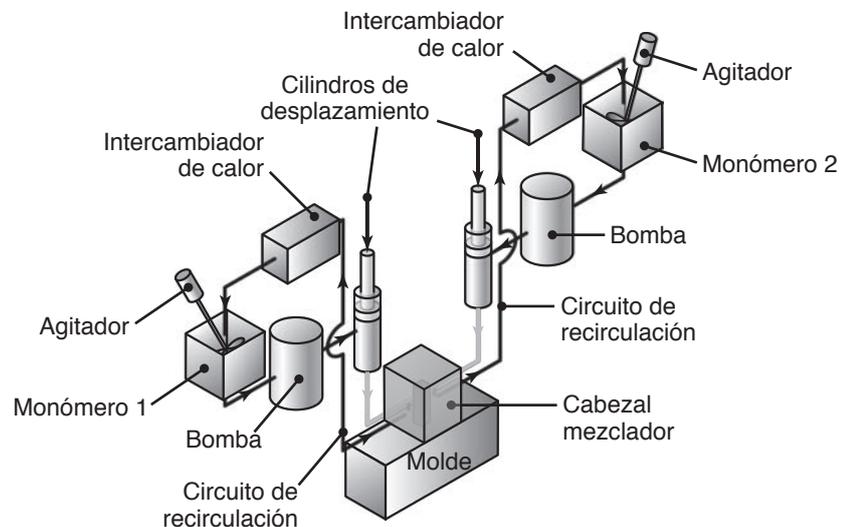


FIGURA 19.13 Ilustración esquemática del proceso de moldeo por inyección reacción; las piezas típicas que se fabrican son paneles para carrocerías de automóviles, esquís acuáticos y aislamiento térmico para refrigeradores y congeladores.

son poliuretano, nailon y epóxicos. Los tiempos de ciclo pueden llegar a ser hasta de 10 minutos, dependiendo de los materiales, el tamaño y la forma de la pieza.

Las principales aplicaciones de este proceso incluyen piezas de automóviles (como parachoques, defensas, volantes y paneles de instrumentos), aislamiento térmico de refrigeradores y congeladores, motocicletas acuáticas y refuerzos para componentes estructurales. Las piezas fabricadas pueden pesar hasta 50 kg (110 lb). Para mejorar la fuerza y rigidez del producto, también pueden usarse fibras de refuerzo (como vidrio o grafito). Dependiendo del número de piezas a fabricar y de la calidad requerida en la pieza, los moldes pueden hacerse de materiales como acero o aluminio.

19.4 Moldeo por soplado

El *moldeo por soplado* es un proceso modificado de moldeo por extrusión e inyección. En el **moldeo por extrusión soplado**, primero se extruye un tubo o preforma (generalmente orientado de manera vertical). Después se le sujeta a la entrada de un molde que tiene una cavidad mucho más grande que el diámetro del tubo, y se sopla hasta llenar la cavidad del molde (figura 19.14a). Dependiendo del material, la relación de soplado puede ser tan alta como 7:1. El soplado suele hacerse con un torrente de aire caliente a una presión que oscila desde 350 hasta 700 kPa (50 a 100 psi). Por medio de este proceso pueden hacerse toneles de plástico con un volumen de hasta 2000 litros (530 galones). Los materiales de molde típicos son acero, aluminio y cobre berilio.

En algunas operaciones, la extrusión es continua y los moldes se desplazan con el tubo. Los moldes se cierran alrededor del tubo, sellando un extremo, rompiendo el largo tubo en secciones individuales y alejándose a medida que se inyecta aire en la pieza tubular. La pieza se enfría y expulsa del molde. Tubos y ductos de plástico corrugado se hacen mediante moldeo por soplado continuo, en el que el tubo o ducto se extruye horizontalmente y luego es soplado en moldes móviles.

En el **moldeo por inyección soplado**, una pieza tubular corta (**preforma** o **parison**) se moldea por inyección en moldes fríos (figura 19.14b). Enseguida, los moldes se abren y la preforma se transfiere a un molde para su moldeo por soplado utilizando un mecanismo de indexación (figura 19.14c). En la preforma, se inyecta aire caliente expandiéndola hasta ponerla en contacto con las paredes de la cavidad del molde. Los productos típicos que se fabrican son botellas de plástico para bebidas (generalmente de polietileno o polietereketona, PEEK) y pequeños contenedores huecos. Un proceso relacionado es el **moldeo por estirado y soplado**, en el que la preforma se expande y alarga simultáneamente sometiendo el polímero a estirado biaxial y mejorando así sus propiedades.

El **moldeo por soplado de múltiples capas** implica el uso de tubos coextruidos o preformas y, por lo tanto, permite la producción de una estructura en múltiples capas (vea la figura 19.4b). Un ejemplo típico de tal producto son los envases de plástico para alimentos y bebidas, que tienen características como barrera de permeabilidad para el olor y protección del sabor y el aroma, resistencia a la abrasión, capacidad de ser impresos y capacidad de ser llenados con fluidos calientes. Otras aplicaciones de este proceso están en los envases de cosméticos y en la industria farmacéutica.

19.5 Moldeo rotacional

La mayoría de los termoplásticos y algunos termofijos pueden formarse en piezas grandes y huecas mediante *moldeo rotacional*, o rotomoldeo. En este proceso, un molde metálico de pared delgada está hecho en dos piezas (molde partido-hembra) y es diseñado para girar alrededor de dos ejes perpendiculares (figura 19.15). Para cada ciclo de la pieza, se coloca una cantidad medida previamente de material plástico en polvo dentro del molde tibio. (El polvo se obtiene mediante un proceso de polimerización que precipita un polvo a partir de un líquido). Después, el molde se calienta, por lo general en un gran horno, y se hace girar continuamente sobre sus dos ejes principales.

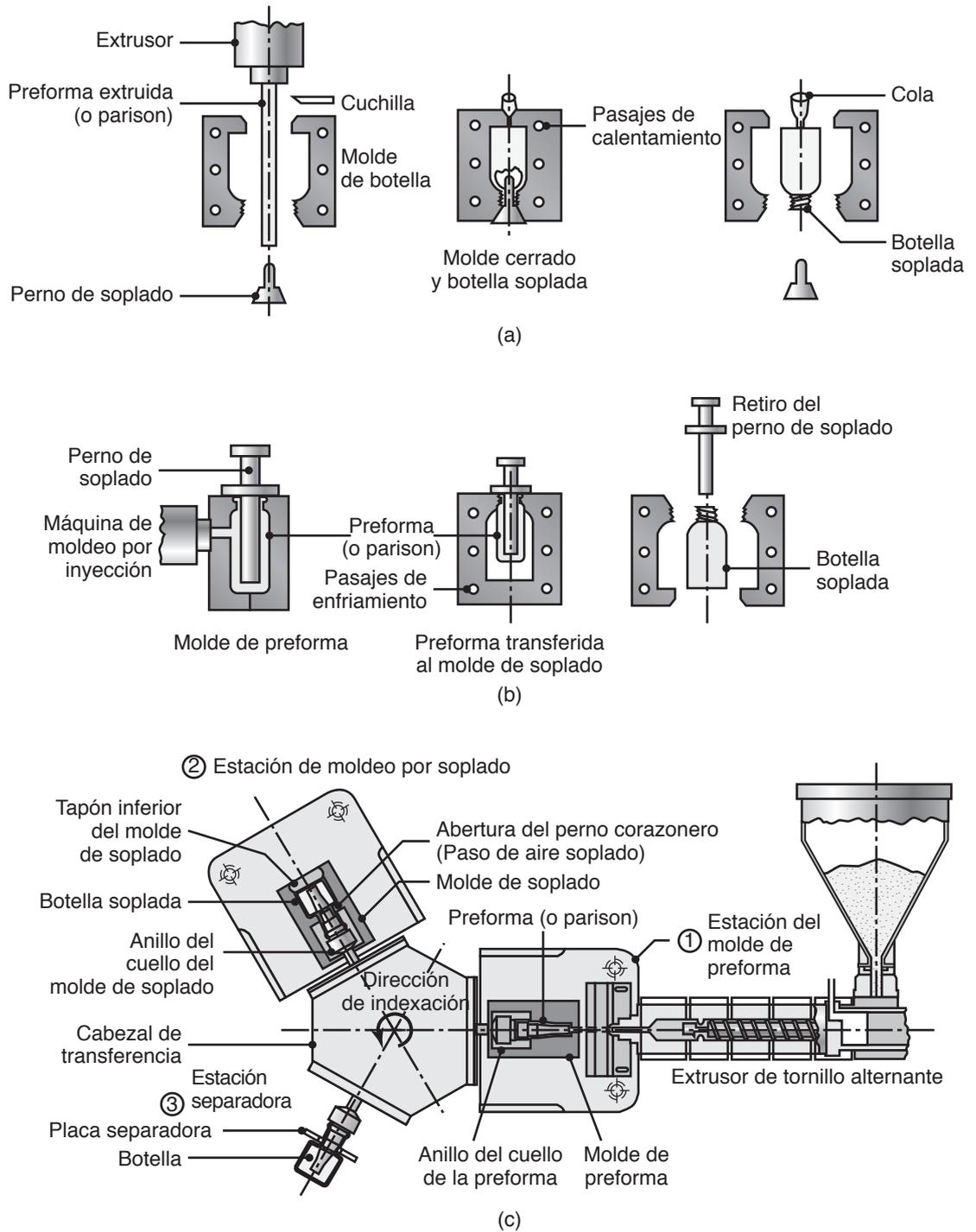


FIGURA 19.14 Ilustraciones esquemáticas de (a) el proceso de moldeo por extrusión soplado para la fabricación de botellas de plástico para bebidas; (b) el proceso de moldeo por inyección soplado; (c) máquina de moldeo por inyección soplado de tres estaciones para fabricar botellas de plástico.

Esta acción hace caer el polvo contra el molde, donde el calor lo fundiona, pero sin derretirlo. Para las piezas termofijas, se añade un agente químico al polvo; después de que se forma la pieza en el molde, se produce enlazamiento cruzado. Las máquinas son altamente automatizadas, con partes accionadas por un mecanismo de indexación similar al mostrado en la figura 19.14c.

Existe una gran variedad de piezas fabricadas mediante moldeo rotacional, como tanques de almacenamiento, contenedores de basura, cascos de barcos, cubetas, carcasas, juguetes huecos grandes, cajas para transportación y balones de fútbol. El acabado superficial exterior de la pieza es una réplica del acabado superficial de las paredes del molde interior. También es posible moldear integralmente con insertos o componentes metálicos o de plástico dentro de las piezas.

Además de polvos, en el rotomoldeo se pueden utilizar polímeros líquidos (**plastisoles**), donde los plastisoles de PVC representan el material más común. En esta operación, llamada **moldeo en hueco** o *fundición en hueco*, el molde se calienta y simultáneamente se hace girar. Debido a la acción de volteo, el polímero se fuerza contra las paredes interiores del molde, donde se funde y reviste las paredes. La pieza se enfría cuando todavía está girando y se retira mediante la apertura del molde. Las piezas que se fabrican comúnmente son productos de pared delgada, maletas, cucharas para grúas aéreas y juguetes.

Capacidades del proceso. El moldeo rotacional puede producir piezas con formas complejas y huecas, con espesores de pared de tan sólo 0.4 mm (0.016 pulg). Se han producido piezas tan grandes como 1.8 m × 1.8 m × 3.6 m (6 pies × 6 pies × 12 pies), con un volumen tan grande como 80 000 litros (21 000 galones). Los tiempos de ciclo son más largos que en otros procesos de moldeo. Por lo general, las consideraciones de control de calidad implican el peso exacto del polvo, la velocidad de rotación adecuada del molde y las relaciones apropiadas de la temperatura y el tiempo durante el ciclo de horneado.

19.6 Termoformado

El *termoformado* es un proceso para dar forma a láminas o películas termoplásticas en un molde mediante la aplicación de calor y presión (figura 19.16). En este proceso, una lámina (a) se sujeta y calienta hasta el *punto de hundimiento* o reblandecimiento (por encima de la *temperatura de transición vítrea*, T_g , del polímero; tabla 7.2), generalmente por calentamiento radiante, y (b) se fuerza contra las superficies del molde aplicando vacío o presión de aire. Las láminas están disponibles en bobina o como piezas en bruto con longitudes y anchuras de varios tamaños.

El molde suele estar a temperatura ambiente; por lo tanto, la forma producida permanece fija al entrar en contacto con el molde. Debido a la baja resistencia de los materiales moldeados, la diferencia de presión causada por un vacío casi siempre es suficiente para el formado. Las piezas complejas y más gruesas requieren mayor presión del aire, la cual puede variar desde aproximadamente 100 hasta 2000 kPa (15 a 300 psi), dependiendo del tipo de material y de su espesor. También se pueden emplear medios mecánicos, por ejemplo tapones, para ayudar a formar las piezas. En la figura 19.16 se muestran algunas variaciones del proceso básico de termoformado.

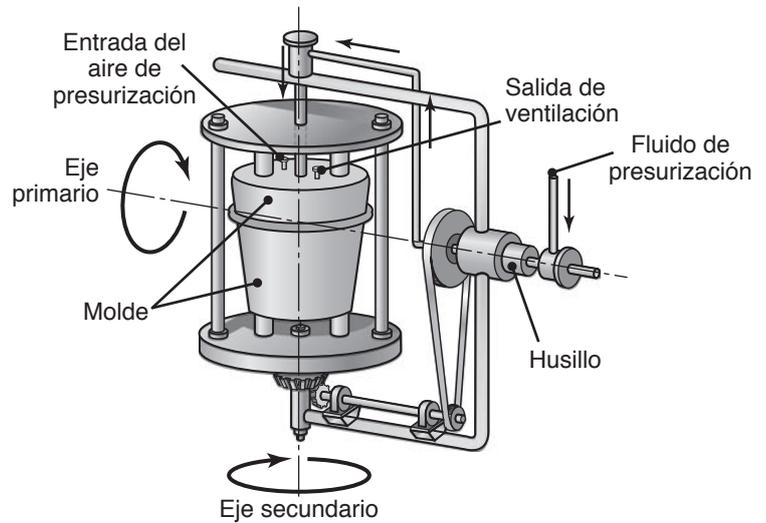


FIGURA 19.15 Proceso de moldeo rotacional (rotomoldeo o rotofundición); mediante este proceso se pueden hacer botes de basura, cubetas y balones de plástico.

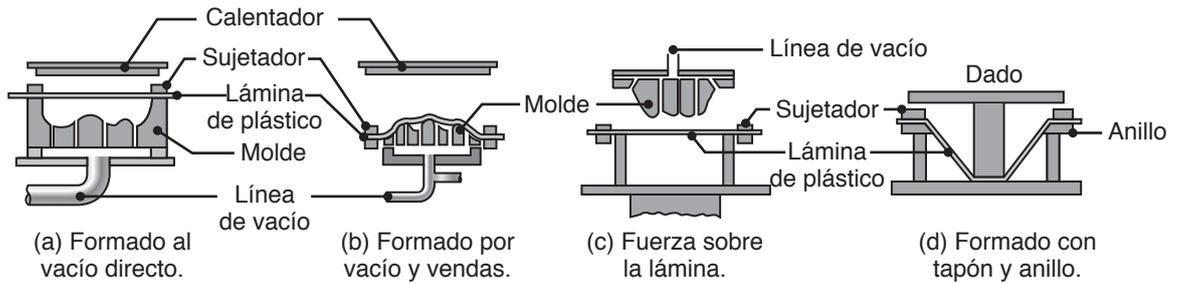


FIGURA 19.16 Diversos procesos de termoformado para lámina termoplástica; estos procesos se utilizan comúnmente en la fabricación de carteles publicitarios, bandejas para galletas y dulces, cabinas para ducha y empaques.

Capacidades del proceso. Las piezas típicas hechas por termoformado son envases, bandejas (por ejemplo para galletas y dulces), carteles publicitarios, revestimientos de refrigeradores, carcasas de aparatos eléctricos y cabinas para ducha. Las piezas con aberturas u orificios no pueden formarse por este proceso ya que no se puede mantener una diferencia de presión durante el formado. Debido a que el termoformado es una combinación de las operaciones de *embutido* y *estirado*, igual que en algunos procesos de formado de láminas metálicas, el material debe presentar una alta elongación uniforme porque, en caso contrario, se formaría un cuello y se desgarraría. Los termoplásticos tienen altas capacidades de elongación uniforme dado su alto exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación, m , como se describe en la sección 2.2.7.

Por lo general, los moldes para termoformado están hechos de aluminio, puesto que no se requiere alta resistencia, por lo que los dados son relativamente baratos. Los moldes tienen pequeños orificios pasados con el fin de ayudar a la formación al vacío. Estos orificios suelen tener un diámetro menor a 0.5 mm (0.02 pulg), de lo contrario podrían dejar marcas circulares en las piezas formadas. Los *defectos* que se encuentran en el termoformado incluyen (a) el desgarramiento de la lámina durante su formado, (b) un espesor de pared excesivamente irregular, (c) moldes llenados incorrectamente, (d) definición deficiente de la pieza y (e) ausencia de detalles superficiales.

19.7 Moldeo por compresión

En el *moldeo por compresión*, una carga preformada de material, un volumen previamente medido de polvo o una mezcla viscosa de resina y material de relleno se colocan directamente en la cavidad de un molde calentado, el cual se encuentra aproximadamente a 200 °C (400 °F), pero puede estar mucho más caliente. El formado tiene lugar bajo la presión de un tapón (dado) o de la mitad superior del molde (figura 19.17), por lo que el proceso es algo similar al forjado metálico en molde cerrado (sección 14.3). Los polímeros también pueden moldearse por el prensado isostático en frío o en caliente como se describe en la sección 17.3.2.

Las presiones van desde alrededor de 10 hasta 150 MPa (1400 a 22 000 psi). Como puede verse en la figura 19.17, se forma una rebaba, la cual es eliminada posteriormente por troquelado o algunos otros medios como el rebabeo. Las piezas típicas que se fabrican son platos, asas, tapas de recipientes, accesorios, componentes eléctricos y electrónicos, agitadores de lavadora y carcasas. Las piezas reforzadas con fibra trozada también se forman mediante este proceso.

El moldeo por compresión se utiliza principalmente con plásticos termofijos, con el material original en un estado parcialmente polimerizado; los termoplásticos y elastómeros también se procesan mediante moldeo por compresión. Los tiempos de curado se encuentran en el intervalo de 0.5 a 5 min, dependiendo del material y del espesor y la forma de la pieza. Cuanto más grueso sea el material, más largo es el tiempo de curado que se requiere.

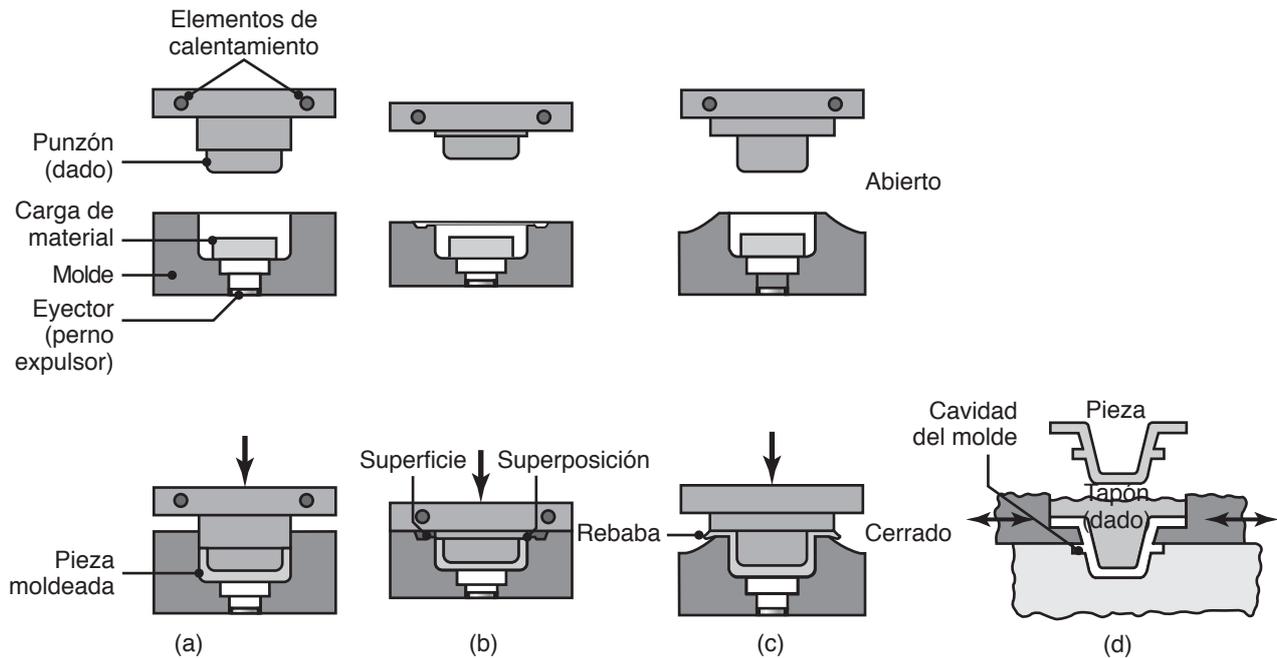


FIGURA 19.17 Tipos de moldeo por compresión, un proceso similar al forjado: (a) positivo; (b) semipositivo y (c) con rebaba, donde la rebaba se recorta posteriormente. (d) Diseño de molde para hacer una pieza moldeada por compresión con rebajos externos.

Capacidades del proceso. Se realizan tres tipos de moldes de compresión:

- *Tipo rebaba*, para las piezas poco profundas o planas.
- *Tipo positivo*, para las piezas de alta densidad.
- *Tipo semipositivo*, para la producción de calidad.

Los rebajos en las piezas no son recomendables; sin embargo, el molde puede diseñarse para abrir hacia los lados (figura 19.17d) con el fin de permitir la extracción de la pieza moldeada. En general, la complejidad de las piezas producidas es menor que la de moldeo por inyección, pero el control dimensional resulta mejor. Las áreas superficiales de las piezas moldeadas por compresión pueden variar hasta aproximadamente 2.5 m^2 (8 pies^2). Debido a su relativa simplicidad, los moldes para el moldeo por compresión generalmente son menos costosos que los de moldeo por inyección. Los materiales de los moldes suelen ser aceros de herramienta y pueden cromarse o pulirse para mejorar el acabado superficial del producto moldeado.

19.8 Moldeo por transferencia

El *moldeo por transferencia* es un desarrollo adicional del moldeo por compresión. Se coloca resina termofija sin curar en una olla o cámara de transferencia calentada (figura 19.18), se calienta y se inyecta en moldes cerrados que también están calientes. Dependiendo del tipo de máquina usada, un ariete, un émbolo o un tornillo giratorio de avance obligan al material a fluir a través de canales estrechos hacia la cavidad del molde a presiones de hasta 300 MPa (43 000 psi). El flujo viscoso genera un calor considerable que eleva la temperatura del material y lo homogeneiza; el curado tiene lugar por enlazamiento cruzado. Debido a que la resina está en estado fundido cuando entra en los moldes, la complejidad de las piezas producidas y su control dimensional se acercan a los del moldeo por inyección.

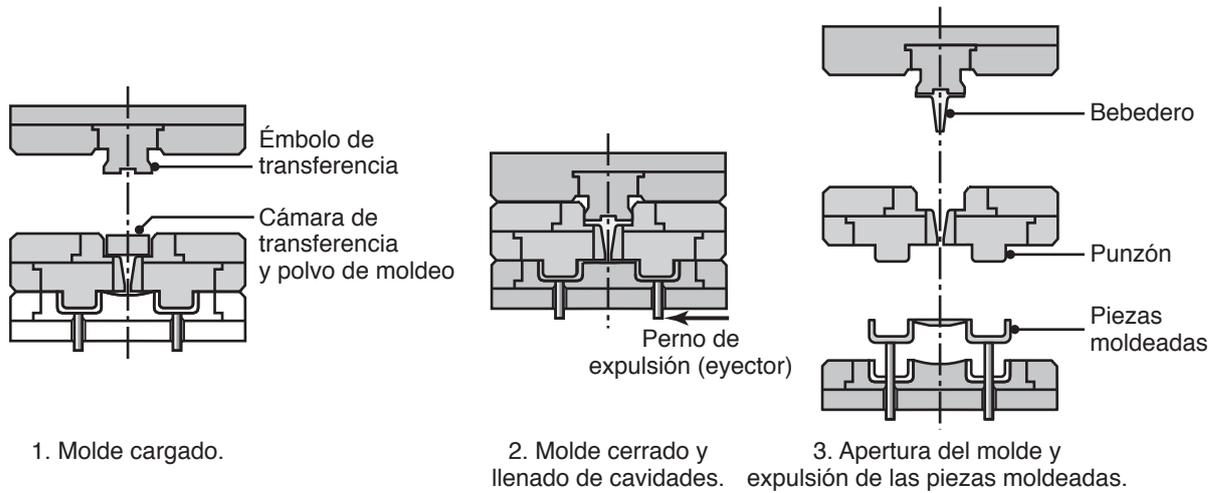


FIGURA 19.18 Secuencia de operaciones en el moldeo por transferencia para plásticos termofijos; este proceso es particularmente adecuado para piezas complejas con espesor de pared variable.

Capacidades del proceso. Las piezas comunes que se fabrican mediante el moldeo por transferencia son conectores eléctricos y componentes electrónicos, piezas de hule o silicona y encapsulado de dispositivos microelectrónicos. El proceso resulta especialmente adecuado para formas complejas con diferentes espesores de pared. Los moldes tienden a ser más caros que los del moldeo por compresión y, durante el llenado, quedan algunos excedentes de material en los canales del molde, los cuales se eliminan más tarde.

19.9 Colado

Algunos termoplásticos, como el nailon y los acrílicos, así como los plásticos termofijos, por ejemplo los epóxicos, fenólicos, poliuretanos y el poliéster, pueden *colarse* en una variedad de formas, ya sea utilizando moldes rígidos o flexibles (figura 19.19a). En comparación con otros métodos de procesamiento de plásticos, el colado es un proceso lento pero simple y de bajo costo. Además, el polímero debe tener una viscosidad lo suficientemente baja como para fluir fácilmente en el molde. Las piezas típicas que se funden son engranes (especialmente de nailon), cojinetes, ruedas, láminas gruesas, lentes y componentes que requieren resistencia al desgaste abrasivo.

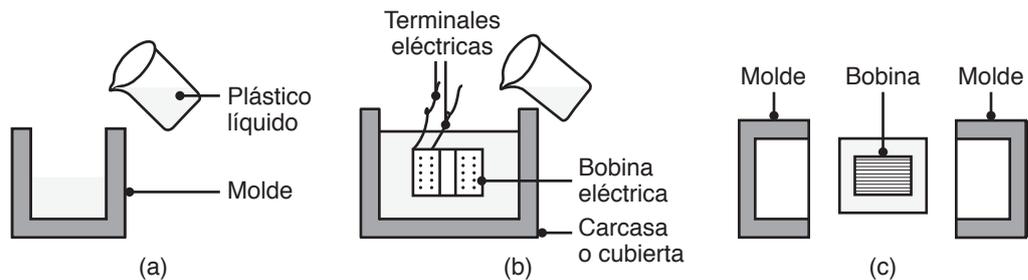


FIGURA 19.19 Ilustración esquemática de los procesos de (a) colado, (b) rellenado y (c) encapsulado de plásticos y ensamblajes eléctricos, donde el plástico circundante sirve como un dieléctrico.

En el colado convencional básico de termoplásticos, se calienta una mezcla de un monómero, un catalizador y diversos aditivos (*activadores*) por encima de su punto de fusión, T_m , y se vierte en el molde. La pieza se conforma después de la polimerización llevada a cabo a presión ambiente. Es posible producir formas complejas usando *moldes flexibles* que luego se separan (de una manera similar al uso de guantes de goma) y se vuelven a utilizar. Así como sucede con los metales (sección 5.4), los termoplásticos pueden fundirse de manera continua, transportando el polímero a lo largo de bandas de acero inoxidable continuas y polimerizándolo mediante calor externo.

Fundición centrífuga. Este proceso es similar a la fundición centrífuga de metales, descrita en la sección 11.4.6, y se utiliza en termoplásticos, termofijos y plásticos reforzados con fibras cortas.

Rellenado y encapsulado. Como una variación del colado, particularmente importante para la industria eléctrica y electrónica, el *rellenado* y el *encapsulado* implican el colado de material plástico (típicamente una resina líquida, como el epoxy) alrededor de un componente eléctrico (por ejemplo un transformador) para sumergirlo en el plástico. El *rellenado* (figura 19.19b) se lleva a cabo en una carcasa o caja que se convierte en parte integral del componente. En el *encapsulado* (figura 19.19c), el componente se recubre con una capa de plástico que lo rodea por completo y luego se solidifica.

En estos dos procesos, el material plástico puede servir como un *dieléctrico* (no conductor) y, en consecuencia, debe estar libre de humedad y porosidad, lo que requeriría un procesamiento al vacío. Los materiales del molde pueden ser metales, vidrios o diversos polímeros. Algunos miembros estructurales pequeños, como ganchos y clavos, se pueden encapsular parcialmente sumergiéndolos en un termoplástico caliente. Está disponible una amplia variedad de colores y durezas de polímero.

19.10 Moldeo de espuma

Productos como vasos de plástico, envases de alimentos, bloques de aislamiento térmico y materiales de embalaje formados, por ejemplo para el transporte de electrodomésticos, computadoras y aparatos electrónicos, se hacen por *moldeo de espuma* utilizando partículas de **poliestireno expandible** como materia prima. Estos productos tienen una **estructura celular** donde pueden existir o una *porosidad abierta e interconectada* (para los polímeros con baja viscosidad) o *células cerradas* (para los polímeros de alta viscosidad).

Existen varias técnicas que se pueden utilizar en el moldeo de espuma. En la operación básica, las partículas de poliestireno, obtenidas mediante polimerización de un monómero de estireno, se colocan en un molde con un agente insuflante, típicamente pentano (un hidrocarburo volátil) o un gas inerte (nitrógeno), y se exponen al calor, por lo general mediante vapor de agua. Como resultado, las partículas se expanden hasta 50 veces su tamaño original tomando la forma de la cavidad del molde. La cantidad de expansión puede controlarse variando la temperatura y el tiempo. Se pueden añadir otras diversas partículas, incluyendo perlas huecas de vidrio o esferas de plástico, para impartir características estructurales específicas a la espuma producida.

Las partículas de poliestireno están disponibles en tres tamaños: (a) pequeño, para fabricar tazas con una densidad en la pieza acabada de aproximadamente 50 kg/m^3 (3 lb/ pie^3); (b) medio, para formas moldeadas, y (c) grande, para el moldeo de bloques de aislamiento con una densidad aproximada en la pieza acabada de 15 a 30 kg/m^3 (los cuales pueden cortarse posteriormente a la medida). El tamaño del grano seleccionado también depende del grosor mínimo de pared del producto; cuanto menor sea el tamaño, más delgada será la pieza. Las partículas pueden colorearse antes de la expansión, con lo que se logra una pieza coloreada integralmente. Tanto los termoplásticos como los termofijos pueden utilizarse en el moldeo de espuma, pero los termofijos tienen una forma de procesamiento líquido y, por lo tanto, están en una condición similar a la de los polímeros en el moldeo por inyección reacción.



FIGURA 19.20 Sección transversal de un moldeado de espuma estructural que muestra una piel densa y un núcleo poroso. Fuente: Cortesía de M&T Industries.

Un método común utilizado para el moldeo de espuma es el uso de partículas de *poliestireno preexpandidas*, donde éstas se expanden parcialmente mediante vapor (también se puede utilizar aire caliente, agua caliente o un horno) en una cámara de techo abierto. Después, las partículas se colocan en un recipiente de almacenamiento y se dejan estabilizar durante un periodo de entre 3 y 12 horas. Posteriormente pueden moldearse en las formas deseadas, de igual manera que la descrita anteriormente.

Moldeo de espuma estructural. Este proceso es utilizado para hacer productos de plástico con una *piel exterior sólida* y una *estructura de núcleo celular* (figura 19.20). Los productos típicos que se fabrican son componentes para muebles, carcasas de computadora y aparatos de oficina y molduras (para reemplazar las molduras de madera que son más caras). En este proceso, los termoplásticos se mezclan con un agente insuflante (por lo general

un gas inerte como el nitrógeno) y se moldean por inyección en moldes fríos para obtener las formas deseadas. El enfriamiento rápido contra las superficies del molde frío produce una piel que es rígida, con espesor de hasta 2 mm (0.08 pulg), y un núcleo de la pieza con estructura celular. La densidad general de la pieza puede ser tan baja como 40% de la densidad del plástico sólido. Por lo tanto, con una piel rígida y un núcleo menos denso, las piezas moldeadas tienen una alta relación de rigidez a peso (vea también la figura 3.2).

Procesamiento de espuma de poliuretano. Algunos productos como cojines de muebles y bloques aislantes se hacen por procesamiento de espuma de poliuretano. Básicamente, la operación comienza con la mezcla de dos o más componentes; posteriormente ocurren reacciones químicas después de que la mezcla (a) se vierte en moldes de diferentes formas o (b) se esparce sobre superficies, con una pistola de rociado, para proporcionar aislamiento acústico y térmico. Existen diversos tipos de máquinas de baja presión y alta presión equipadas con controles por computadora para asegurar una mezcla adecuada. La mezcla se solidifica en una estructura celular cuyas características dependen del tipo y de la proporción de los componentes utilizados.

19.11 Formado en frío y formado en fase sólida

Los procesos que se han utilizado en el trabajo en frío de metales (como la laminación, la forja a molde cerrado, el acuñado, el embutido profundo y el formado en cojín hule descritos todos en la parte III) también pueden usarse para formar termoplásticos a temperatura ambiente (*formado en frío*). Los materiales comunes que se forman son polipropileno, policarbonato, ABS y PVC rígido. Algunas consideraciones importantes sobre este proceso son que (a) el polímero debe ser lo suficientemente dúctil a temperatura ambiente, por lo tanto, poliestirenos, acrílicos y termofijos no pueden formarse, y (b) su deformación no debe ser recuperable con el fin de minimizar la recuperación elástica y la termofluencia de la pieza formada.

Las ventajas del formado en frío sobre otros métodos empleados para dar forma a los plásticos son:

- Se incrementan la resistencia, la tenacidad y la elongación uniforme.
- Los plásticos con pesos moleculares altos (sección 7.2) pueden utilizarse para fabricar piezas con propiedades superiores.
- Las velocidades de formado no se ven afectadas por el espesor de la pieza puesto que, a diferencia de otros métodos de procesamiento, no hay calentamiento o enfriamiento implicados; además, los tiempos de ciclo suelen ser más cortos que en los procesos de moldeo.

Formado en fase sólida. A este proceso también se le llama *formado en estado sólido*, se lleva a cabo a una temperatura de entre 10 y 20 °C (20 y 40 °F) por debajo de la temperatura de fusión del plástico (para un polímero cristalino). Por lo tanto, la operación

de formado se realiza mientras el polímero todavía está en estado sólido. Las principales ventajas de este proceso de formado en frío son que las fuerzas de formado y recuperación elástica son más bajas. Estos procesos no se utilizan tan ampliamente como los métodos de procesamiento en caliente y, por lo general, se limitan a aplicaciones especiales.

19.12 Procesamiento de elastómeros

De la sección 7.9 recuerde que, en términos de sus características de procesamiento, un *elastómero* es un polímero; ahora bien, en términos de su función y desempeño, es un *hule*. La materia prima que se procesa en diferentes formas es básicamente un compuesto de hule y diversos aditivos y rellenos. Los aditivos incluyen negro de carbono, un elemento importante que mejora propiedades como la resistencia a la tensión y a la fatiga, la resistencia a la abrasión y al desgarramiento, la protección ultravioleta y la resistencia a los químicos.

Los materiales elastómeros se mezclan para precipitarlos y reducir su viscosidad; posteriormente, la mezcla se *vulcaniza* empleando azufre como agente de vulcanización. Entonces, el compuesto queda listo para recibir un procesamiento posterior, como el calandrado, la extrusión y el moldeo, que también puede incluir la colocación de refuerzos en formas tales como fibras y tejidos. Durante el procesamiento la pieza se entrelaza, lo que le imparte las propiedades deseables que se asocian con los productos de hule, por ejemplo cámaras de hule para neumáticos.

Los elastómeros pueden conformarse mediante una variedad de procesos que se utilizan también para darle la forma a los termoplásticos. Los elastómeros termoplásticos son formados comúnmente por extrusión o moldeo por inyección, siendo el primero el proceso más económico y más rápido; también pueden formarse mediante moldeo por soplado o termoformado. El poliuretano termoplástico, por ejemplo, puede formarse por cualquiera de los métodos convencionales. También se puede mezclar con hules termoplásticos, compósitos de cloruro de polivinilo, ABS y nailon con el fin de obtener propiedades específicas.

Las temperaturas para efectuar la extrusión de elastómeros se encuentran típicamente en el intervalo de 170 a 230 °C (340 a 440 °F) y, para el moldeo, son hasta de 60 °C (140 °F). La sequedad de los materiales es importante para la integridad del producto. Para impartir mayor resistencia, se utilizan refuerzos junto con extrusión. Algunos ejemplos de productos de elastómeros extruidos son tuberías, mangueras, molduras y cámaras de aire. Los productos de elastómeros moldeados por inyección cubren una amplia gama de aplicaciones, como componentes para automóviles y electrodomésticos.

El hule y algunas láminas termoplásticas se forman mediante el proceso de **calandrado** (figura 19.21), en el cual una masa caliente del compuesto se introduce en una serie de rodillos para que sea **masticado** (comprimido y amasado para formar una pasta). El espesor producido suele ser de 0.3 a 1 mm (0.01 a 0.040 pulg), pero puede ser menor si se estira el material. A continuación, el masticado se desprende, a velocidades del orden de 2 m/s (6.5 pies/s), para formar una lámina que puede ser tan ancha como 3 m (10 pies). Después, el hule calandrado puede moldearse en diversos productos como neumáticos y bandas para maquinaria. El hule o los termoplásticos también se pueden formar sobre ambas superficies de una cinta, papel, tela o plástico para *laminarlos* de manera permanente. Las superficies de los cilindros también pueden texturizarse para producir una lámina de hule con diversos patrones y diseños.

Algunos *productos discretos de hule*, como guantes, globos, gorros de natación, etc., se hacen al *sumergir* o **moldear por inmersión** una forma de metal sólido —por ejemplo la forma de una mano en la fabricación de guantes— varias veces en un compuesto líquido que se adhiere a la forma. Un compuesto típico es el *látex*, una savia similar a la leche obtenida a partir de la corteza interior de un árbol tropical. Posteriormente, el compuesto se vulcaniza (enlazamiento cruzado) por lo general en vapor y se desprende de la forma, convirtiéndose así en un producto discreto.

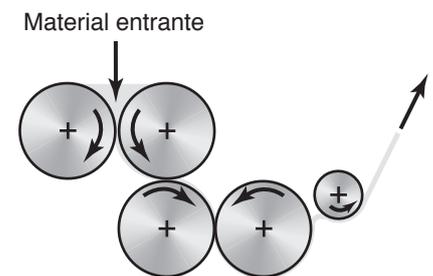


FIGURA 19.21 Ilustración esquemática del calandrado. Las láminas producidas por calandrado se utilizan posteriormente en termoformado; con este proceso también se manufacturan diversos productos de hule y elastómeros.

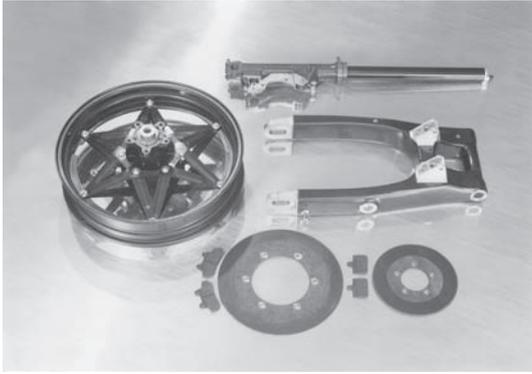


FIGURA 19.22 Componentes de plástico reforzado para una motocicleta Honda, las piezas que se muestran son las horquillas delantera y trasera, un brazo oscilante trasero, una rueda y los discos de frenado.

19.13 Procesamiento de compósitos de matriz polimérica

Tal como se describió en el capítulo 9, los *compósitos de matriz polimérica* (PMC, por sus siglas en inglés), también llamados **plásticos reforzados**, son *materiales de ingeniería* que se diseñan con propiedades mecánicas únicas, relaciones de resistencia a peso y rigidez a peso especialmente altas, resistencia a la fatiga elevada, gran resistencia a la fluencia y propiedades direccionales. Sin embargo, debido a su estructura compleja, los plásticos reforzados requieren métodos especiales para darles forma como productos industriales y de consumo (figura 19.22).

La fabricación para asegurar propiedades confiables en las piezas y estructuras compósitas, sobre todo en el largo plazo de su vida útil, puede ser un reto debido a la presencia de dos o más tipos de materiales. La matriz y las fibras de refuerzo presentes en el compósito tienen, por su diseño, propiedades y características muy diferentes y, por lo tanto, distintas respuestas a los métodos de procesamiento (sección 9.2).

Los diferentes pasos necesarios para la fabricación de plásticos reforzados, y el tiempo y el cuidado involucrados, hacen que los costos de procesamiento sean muy altos y, generalmente, no competitivos con la manufactura de materiales y formas más comunes. Esta situación ha obligado a evaluar e integrar los procesos de diseño y manufactura (*ingeniería concurrente*) adecuados con el fin de aprovechar las propiedades únicas de estos compósitos. Lo anterior debe hacerse al minimizar los costos de manufactura manteniendo la integridad a largo plazo, la confiabilidad y la tasa de producción del artículo. Un problema ambiental y de seguridad importante en los plásticos reforzados es el polvo generado durante el procesamiento. Por ejemplo, las fibras de carbono presentes en el aire son conocidas por permanecer en el área de trabajo mucho después de completar la manufactura de las piezas.

19.13.1 Impregnación de fibras

Para lograr una buena unión entre las fibras de refuerzo y la matriz de polímero, y para protegerlas durante su manejo, las fibras se tratan superficialmente por impregnación (*encolado*). Cuando la impregnación se lleva a cabo como una etapa separada, las hojas resultantes parcialmente curadas se denominan mediante diversos términos, como se describe a continuación.

Preimpregnados (prepregs). En un procedimiento típico para la fabricación de plásticos *prepregs* (que significa preimpregnados con resina) reforzados con fibra, las fibras continuas se alinean y someten a un tratamiento superficial para mejorar la adhesión a la matriz polimérica (figura 19.23a). A continuación, se recubren por inmersión en un baño de resina y se les da forma de cinta (figura 19.23b) con anchuras características de entre 75 y 150 mm (3 y 6 pulg). Posteriormente, se cortan segmentos individuales de la cinta preimpregnada que se ensamblan en *estructuras laminadas* (figura 19.24a), como en el caso del estabilizador horizontal para el avión de combate F-14.

Los compósitos típicos elaborados a partir de productos preimpregnados son paneles arquitectónicos planos u ondulados, paneles para construcción y aislamiento eléctrico y componentes estructurales de aeroplanos, los cuales requieren una buena retención de las propiedades durante cierto periodo y en condiciones adversas (incluyendo resistencia a la fatiga en condiciones calientes o húmedas), que se utilizan por lo común en aviones militares.

Debido a que el proceso de colocación de cintas preimpregnadas es una operación que requiere mano de obra intensiva y mucho tiempo, se han construido máquinas instaladoras de cintas y *controladas por computadora altamente automatizadas* (figura 19.24b). Las cintas preimpregnadas se cortan automáticamente a partir de un carrete y se colocan

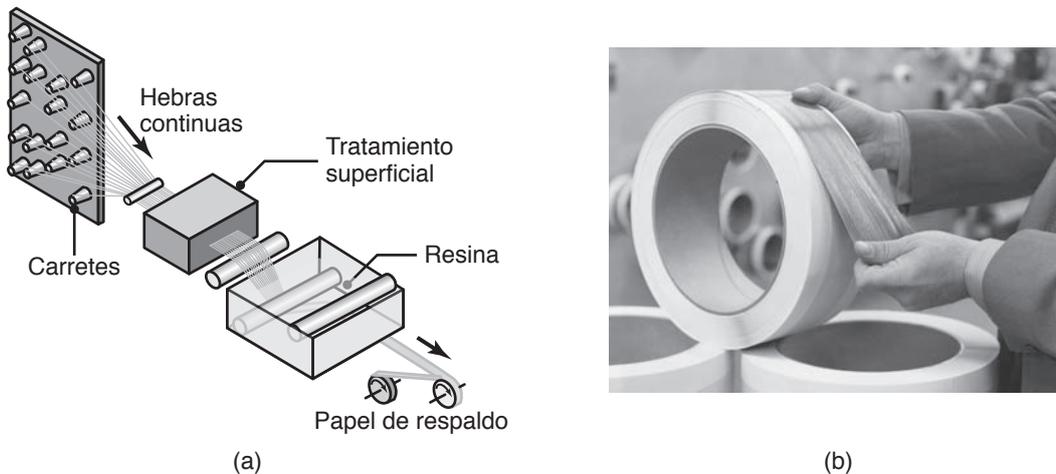
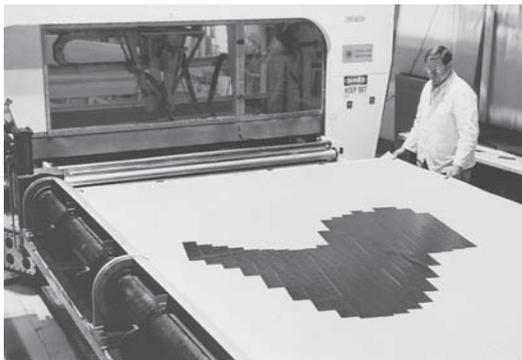
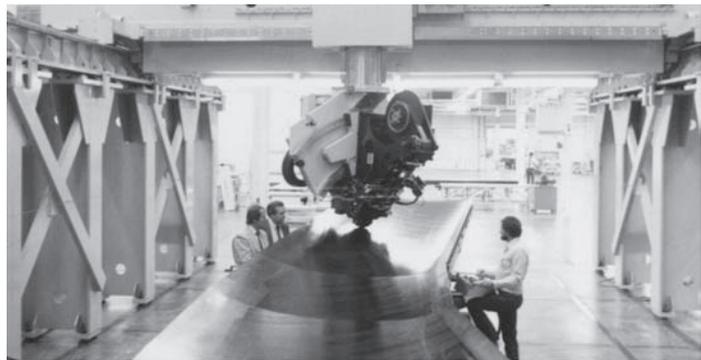


FIGURA 19.23 (a) Proceso de fabricación de cinta de material compuesto con matriz polimérica. (b) Cinta preimpregnada de boro y epoxy. Estas cintas se utilizan en la fabricación de piezas y componentes de plástico reforzado que tienen altas relaciones de resistencia a peso y rigidez a peso; son particularmente importantes para aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales y en el equipamiento deportivo. Fuente: (a) Según T. W. Chou, R. L. McCullough y R. B. Pipes. (b) Cortesía de Avco Specialty Materials/Textron.



(a)



(b)

FIGURA 19.24 (a) Colocación de una cinta de boro y epoxy de una sola capa para el estabilizador horizontal de un avión de combate F-14. (b) Sistema de colocación de cinta de 10 ejes controlado numéricamente por computadora; esta máquina es capaz de colocar cintas de hasta 75 y 150 mm (3 y 6 pulg) de ancho en contornos curvos y a velocidades de hasta 0.5 m/s (1.7 pies/s). Fuente: (a) Cortesía de Grumman Aircraft Corporation. (b) Cortesía de The Ingersoll Milling Machine Company.

en un molde que tiene los patrones deseados, obteniendo mucho mejor control dimensional del que puede conseguirse de forma manual. Los patrones de diseño pueden modificarse fácil y rápidamente, para una gran variedad de piezas, mediante control por computadora y con una alta capacidad de repetición.

Compuesto de moldeo de láminas. Al realizar *compuestos de moldeo de láminas* (SMC, por sus siglas en inglés), primero se trozan hebras continuas de fibra de refuerzo para formar fibras cortas (figura 19.25) que se depositan en orientaciones aleatorias sobre una capa de pasta de resina. Por lo general, la pasta es una mezcla de poliéster (que puede contener rellenos, como varios polvos minerales) y se deposita en una película de polímero, como el polietileno. Una segunda capa de pasta de resina se deposita en la parte superior y la lámina se prensa entre rodillos.

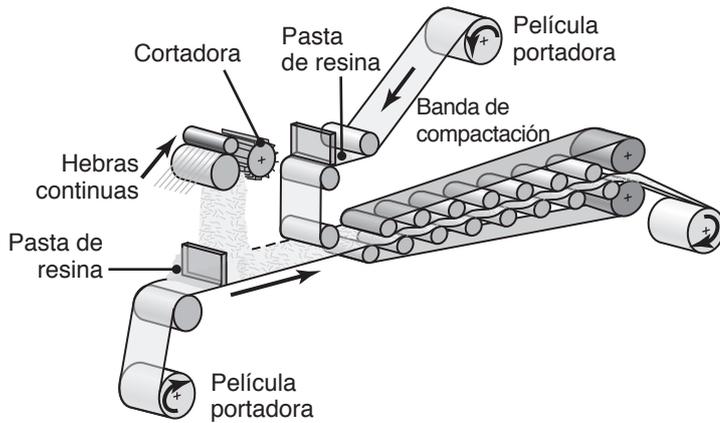


FIGURA 19.25 Ilustración esquemática del proceso de manufactura para la producción de láminas de plástico reforzadas con fibra; la lámina sigue siendo viscosa en esta etapa y posteriormente puede formarse en diversos productos. Fuente: Según T.-W. Chou, R. L. McCullough y R. B. Pipes.

Posteriormente, el producto se colecta en rollos, o se coloca en contenedores en varias capas, y se almacena hasta que haya experimentado cierto periodo de maduración y alcance la viscosidad deseada. El proceso de maduración ocurre bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, y por lo general tarda alrededor de un día.

Los compuestos moldeados deben almacenarse a una temperatura lo suficientemente baja como para retrasar el curado. Tienen una vida limitada en almacenamiento, generalmente alrededor de 30 días y, por lo tanto, deben procesarse dentro de este periodo. En forma alternativa, la resina y las fibras pueden mezclarse entre sí únicamente en el momento en que se van a colocar en el molde.

Compuesto de moldeo volumétrico. Los *compuestos de moldeo volumétrico* (BMC, por sus siglas en inglés) tienen la forma de palanquillas (de ahí el término “volumétrico”) y, por lo general, miden hasta 50 mm (2 pulg) de diámetro. Se

hacen de igual manera que los SMC y se extruyen para producir una forma volumétrica. Cuando se procesan en productos, los BMC tienen características de flujo que son similares a los de la masa de harina, por lo que también se denominan *compuestos para el moldeo de masa*.

Compuesto de moldeo grueso. Los *compuestos de moldeo grueso* (TMC, por sus siglas en inglés) combinan una característica de los BMC (menor costo) con una de los SMC (mayor resistencia). Por lo general, se moldean por inyección utilizando fibras trozadas a diferentes longitudes. Una de sus aplicaciones tiene lugar en los componentes eléctricos debido a su alta resistencia dieléctrica.

19.13.2 Moldeo de plásticos reforzados

Existen diversos procesos de moldeo que se usan en los plásticos reforzados.

Moldeo por compresión. El material se coloca entre dos moldes y se aplica presión. Los moldes pueden estar a temperatura ambiente o pueden calentarse para acelerar el endurecimiento de la pieza. El material puede ser un compuesto de moldeo volumétrico, que es una mezcla viscosa y pegajosa de polímeros, fibras, aditivos y polvo, o puede ser un termofijo no curado con una consistencia parecida a la masa de harina. En general, se moldea en la forma de un trozo que posteriormente se corta en rodajas o en la forma deseada. Las longitudes de las fibras se extienden generalmente desde 3 hasta 50 mm (0.125 a 2 pulg), aunque también se pueden usar fibras más largas de 75 mm (3 pulg).

Mediante el moldeo por compresión, también pueden procesarse compuestos de moldeo de láminas; los cuales son similares a los compuestos de moldeo volumétrico, excepto que la mezcla de resina y fibra se coloca entre las láminas de plástico para hacer un sándwich que puede manejarse fácilmente. Las láminas tienen que retirarse antes de colocar el compuesto de moldeo de lámina en el molde.

Moldeo por bolsa al vacío. En este proceso (figura 19.26a), se colocan plásticos preimpregnados en un molde para obtener la forma deseada. La presión requerida, para dar forma al producto y asegurar una buena unión, se aplica cubriendo el material con una bolsa de plástico y creando un vacío. El curado tiene lugar a temperatura ambiente o en un horno.

Una variación de este proceso es el **moldeo por bolsa a presión** (figura 19.26b). Una bolsa flexible se coloca sobre la mezcla de resina y fibras de refuerzo; a continuación, se aplica presión sobre el molde y en un intervalo típico de 200 a 400 kPa (30 a 50 psi).

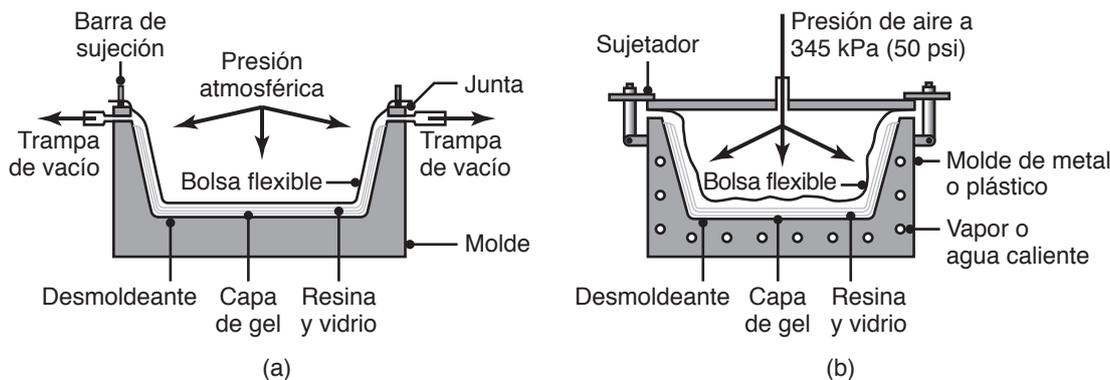


FIGURA 19.26 Ilustración esquemática de (a) el moldeo por bolsa al vacío y (b) el moldeo por bolsa a presión; estos procesos se utilizan en la fabricación de piezas discretas de plástico reforzado. Fuente: Según T. H. Meister.

Si se requiere más calor y presión para producir piezas con mayor densidad y menor número de huecos, todo el conjunto se coloca en una *autoclave* (una cámara bajo calor y presión).

Se debe tener cuidado de mantener la orientación de la fibra cuando se desean propiedades direccionales específicas. En los materiales de fibra trozada no se requiere una orientación específica. Para evitar que la resina se pegue a la bolsa al vacío, también para facilitar la eliminación del exceso de resina, se colocan varias láminas de diferentes materiales, a este recurso se le denomina *tela de liberación* o *tela de purga*, en la parte superior de las láminas preimpregnadas.

Los moldes pueden hacerse de metal, generalmente de aluminio, pero más a menudo se hacen de la misma resina (con refuerzo) como el material a ser curado. Esta práctica elimina las dificultades causadas por la diferencia en la dilatación térmica que se presenta entre el molde y la pieza.

Moldeo por contacto. También conocido como *procesamiento a molde abierto*, consiste en una serie de procesos que utilizan un solo molde macho o hembra fabricado a partir de materiales como plásticos reforzados, madera, metal o yeso (figura 19.27). La operación es un método en húmedo, en el que se aplican materiales en capas, y el refuerzo se impregna con la resina al momento del moldeo. El moldeo por contacto se utiliza en la fabricación de *productos laminados* con una alta relación de área superficial a espesor; por lo tanto, el proceso también se conoce como *laminado por contacto*. Algunos ejemplos típicos de productos son piscinas de patio trasero, cascos de barcos, paneles de carrocería para automóvil, unidades de tina y carcasas.

El método más simple para el moldeo por contacto es la **colocación manual**. Los materiales se colocan en el orden apropiado (resinas y refuerzos), se cepillan con monómero líquido y se forman manualmente en el molde con un rodillo (figura 19.27a). La acción de opresión del rodillo expulsa las burbujas de aire atrapadas y compacta la pieza. Los refuerzos colocados en el molde pueden consistir en diversas formas, incluyendo materiales preimpregnados, y es posible controlar su orientación en el producto final.

En la **colocación por aspersión**, el moldeo se realiza mediante la pulverización de los materiales en el molde. Como se observa en la figura 19.27b, tanto la resina como las fibras trozadas se esparcen sobre las superficies del molde. Puede requerirse laminación de los materiales depositados (como en la colocación manual) para eliminar cualquier porosidad. Debido a que las fibras trozadas tienen orientaciones aleatorias, no es posible impartir propiedades direccionales en los productos fabricados mediante colocación por aspersión. También observe que, en la pieza formada, solamente la superficie del lado del molde es lisa porque es la que entra en contacto con las superficies del molde.

Tanto la colocación manual como la colocación por aspersión son operaciones relativamente lentas, tienen altos costos de mano de obra y requieren tiempo y trabajo significativos en las operaciones de acabado. Asimismo, la elección de los materiales que

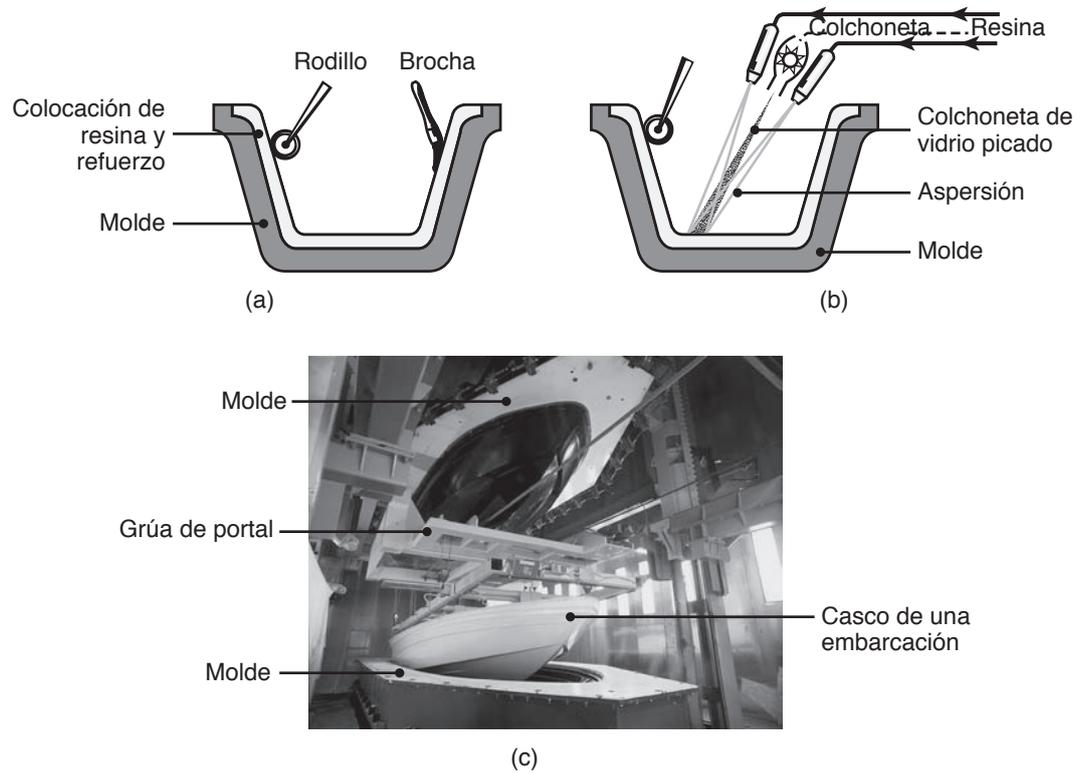


FIGURA 19.27 Métodos manuales de procesamiento de plásticos reforzados con: (a) colocación manual y (b) colocación por aspersión. Observe que, a pesar de que el proceso es lento, sólo se necesita un molde. Las figuras muestran un molde hembra, pero también se usan moldes macho; estos métodos también se denominan *procesamiento a molde abierto*. (c) Casco de una embarcación fabricado mediante estos procesos. Fuente: Cortesía de VEC Technology, LLC.

pueden utilizarse está limitada. Sin embargo, ambos procesos son sencillos de realizar y los herramientas son baratos.

Moldeo por transferencia de resina. Este proceso se basa en el moldeo por transferencia de plásticos (sección 19.8). Una resina se mezcla con un catalizador y se fuerza, mediante una bomba de desplazamiento positivo tipo pistón, a entrar en la cavidad del molde, el cual se rellena con una fibra de refuerzo. El proceso es una alternativa viable a la colocación manual, la colocación por aspersión y el moldeo por compresión para la producción de volumen bajo o intermedio.

Moldeo por transferencia/inyección. Ésta es una operación automatizada que combina los procesos de moldeo por compresión, moldeo por inyección y moldeo por transferencia. La combinación aporta el buen acabado superficial, la estabilidad dimensional y las propiedades mecánicas obtenidas en el moldeo por compresión, así como la posibilidad de aplicar una alta automatización y el bajo costo del moldeo por inyección y el moldeo por transferencia.

19.13.3 Devanado de filamentos, pultrusión y pulformado

Devanado de filamentos. Éste es un proceso en el que la resina y las fibras se combinan al momento del curado (figura 19.28a) con el fin de desarrollar una estructura de material compósito. En un mandril giratorio se producen piezas con simetría axial, como tuberías y tanques de almacenamiento, e incluso piezas no simétricas. El filamento, cinta o colchoneta de refuerzo, se envuelve continuamente alrededor de la forma. Los refuer-

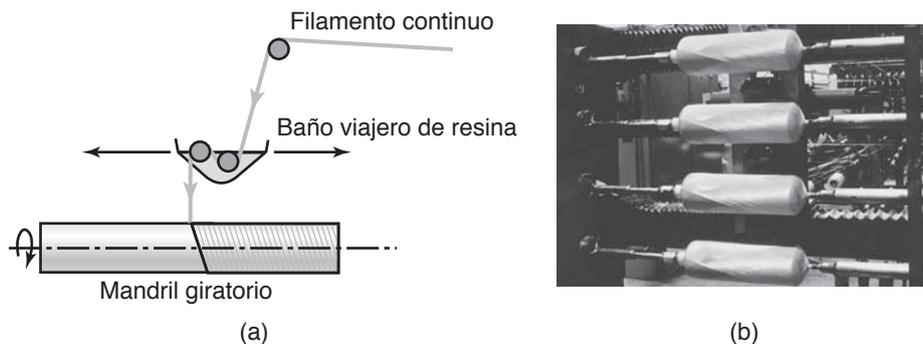


FIGURA 19.28 (a) Ilustración esquemática del proceso de devanado de filamentos; (b) fibra de vidrio devanada sobre forros de aluminio para recipientes inflables deslizantes en el avión Boeing 767. Los productos fabricados por este proceso tienen una alta relación de resistencia a peso y también sirven como recipientes a presión de peso ligero. *Fuente:* Cortesía de Brunswick Corporation.

zos se impregnan haciéndolos pasar a través de un baño de polímero. El devanado de filamentos se puede modificar mediante el uso de un material preimpregnado, como una cinta, para envolver el mandril.

Los productos fabricados mediante el devanado de filamentos son muy resistentes debido a su estructura altamente reforzada. Mediante este proceso, se han fabricado piezas de hasta 4.5 m (15 pies) de diámetro y 20 m (65 pies) de largo. El proceso también se ha utilizado para el reforzamiento de recipientes cilíndricos o esféricos a presión (figura 19.28b), hechos de materiales como aluminio y titanio, donde la presencia de un revestimiento metálico interno hace que la pieza sea impermeable. El devanado de filamentos también puede utilizarse directamente sobre moldes de propulsores sólidos para cohetes. Se han desarrollado máquinas de siete ejes controladas por computadora que dispensan unidireccional y automáticamente diversos plásticos preimpregnados para hacer también piezas no simétricas como conductos de motores para aviones, fuselajes, hélices, aletas y puntales.

Pultrusión. Mediante el proceso de pultrusión, se realizan de manera continua piezas largas con diferentes secciones transversales uniformes, como barras, perfiles, tiras planas y tubos. La secuencia de operaciones se muestra en la figura 19.29. Los refuerzos, filamentos de vidrio o tejidos continuos (normalmente hechos a partir de fibra de vidrio tipo E de aluminosilicato de calcio; vea la sección 9.2.1) se suministran mediante diversas bobinas. El haz de material se pasa primero a través de un baño de polímero termofijo (por lo general poliéster), luego por un molde de preformado y finalmente por un molde de acero calentado.

El producto se cura durante su recorrido a través del molde caliente, que tiene una longitud de hasta 1.5 m (5 pies) y una velocidad que da el tiempo suficiente para que el polímero se fije. Tenga en cuenta que ésta es una operación similar a la cocción continua de pan y galletas o a la fabricación de piedras de esmerilado aglutinadas con resina. El material saliente se corta a las longitudes deseadas. Mediante este proceso han sido hechas secciones transversales de hasta 1.5 m \times 0.3 m (60 pulg \times 12 pulg). Los productos típicos fabricados por pultrusión, que pueden contener hasta 75% de fibras de refuerzo, son palos de golf, palos de esquí, cañas de pescar, ejes de transmisión y elementos estructurales como escaleras, pasarelas y barandillas.

Pulformado. Mediante el *pulformado* se fabrican productos reforzados de manera continua, distintos de aquellos que tienen perfiles de sección transversal constante. Después de pasar a través del baño de polímero, el material compuesto se sujeta entre las dos mitades de un molde y se cura en un producto terminado. Los productos comunes que se fabrican son mangos de martillos reforzados con fibras de vidrio y muelles para automóviles.

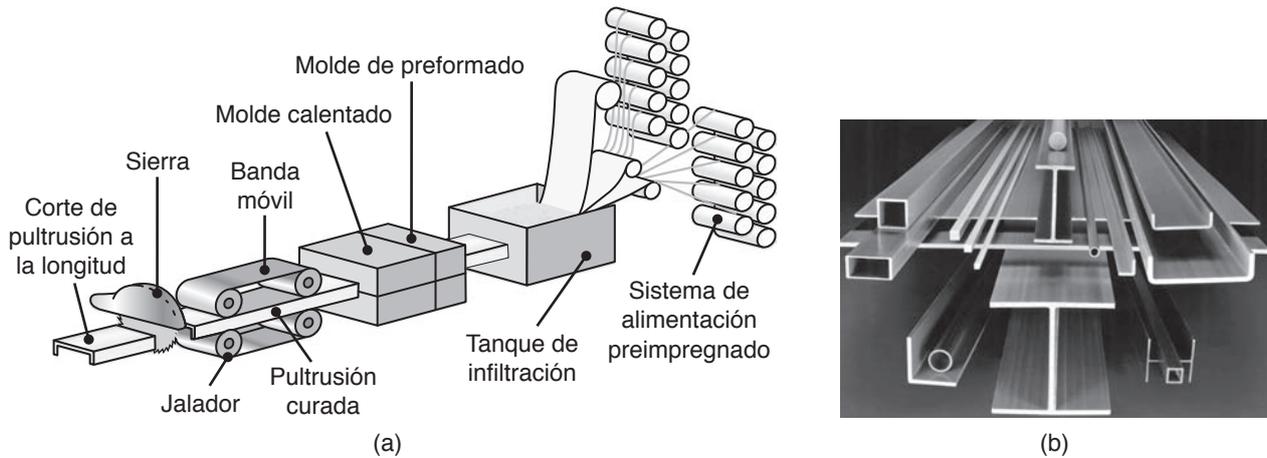


FIGURA 19.29 (a) Ilustración esquemática del proceso de pultrusión. (b) Ejemplos de piezas fabricadas por pultrusión. Los componentes principales de las escaleras de fibra de vidrio (utilizadas especialmente por los electricistas) se hacen mediante este proceso; están disponibles en diferentes colores, pero son más pesadas debido a la presencia de las fibras de vidrio. Fuente: Cortesía de Strongwell Corporation.

CASO DE ESTUDIO 19.1 Paneles de polímero para carrocerías automotrices formados mediante diversos procesos

Los materiales poliméricos se utilizan comúnmente para carrocerías de automóvil; este ejemplo describe aplicaciones típicas de los polímeros. Tres métodos de procesamiento competitivos utilizados comúnmente son: (a) el moldeo por inyección de termoplásticos y elastómeros, (b) el moldeo por inyección reacción de poliurea/poliuretanos y (c) el moldeo por compresión de compuestos de moldeo de láminas con poliéster y viniléster moldeados por transferencia de resina.

Algunos ejemplos típicos de piezas que se fabrican son: (a) paneles para carrocerías y otros grandes componentes exteriores realizados mediante moldeo por inyección, (b) parachoques delanteros y molduras de los cuartos traseros hechos de polifenileno-éter y nailon o poliéster termoplástico, (c) paneles exteriores de las puertas hechos de policarbonato/ABS y (d) las fascias de poliolefina termoplástica. Estos materiales se seleccionan por su flexibilidad de diseño, resistencia al impacto y tenacidad, resistencia a la corrosión, alta durabilidad y baja masa. Los paneles verticales y las fascias se hacen en moldes con cavidades múltiples en

grandes máquinas de moldeo por inyección, luego se ensamblan mecánicamente a un bastidor de acero.

Grandes piezas exteriores de la carrocería también están hechas de poliuretano moldeado por inyección reacción, aunque las poliureas son importantes para los paneles de carrocería y amortiguadores. Las fascias termofijas están hechas de poliuretano reforzado por RIM y poliureas debido a su mayor estabilidad térmica, tenacidad a bajas temperaturas y tiempos de ciclo inferiores. Los grandes paneles horizontales exteriores de la carrocería, como las capuchas, los techos y las cubiertas traseras, son de poliéster reforzado o viniléster en forma de SMC moldeados por compresión. Las piezas de menor volumen se hacen mediante el moldeo por transferencia de resina.

Las consideraciones ambientales y de reciclado de materiales, así como el proceso de selección para los automóviles y otros productos, siguen siendo importantes. Por ejemplo, el óxido de polifenileno está siendo reemplazado con policarbonato, que está hecho en su totalidad con materiales reciclados o regenerados.

19.13.4 Consideraciones sobre la calidad en el procesamiento de plásticos reforzados

En los procesos descritos hasta ahora, las consideraciones más importantes sobre la calidad se refieren a los huecos y espacios presentes entre capas sucesivas de material. Es necesario dejar que los gases volátiles, desarrollados durante el procesamiento, escapen de la capa colocada a través de la bolsa al vacío con el fin de evitar la porosidad debida a gases atrapados. Durante el curado o el transporte y por manipulación inadecuada de las piezas pueden desarrollarse microgrietas. Estos defectos pueden detectarse usando la exploración ultrasónica y otras técnicas descritas en la sección 36.10.

CASO DE ESTUDIO 19.2 Fabricación de raquetas de tenis Head Protector®

El tenis competitivo es un deporte exigente y, en consecuencia, existe una fuerte demanda para la producción de raquetas excepcionalmente ligeras y rígidas que mejoren el rendimiento. Una raqueta de tenis se compone de varias regiones, como se muestra en la figura 19.30. De particular interés es el punto dulce, o región ideal de golpe; cuando la pelota de tenis es golpeada en el punto dulce, el jugador tiene un control y poder óptimos y la vibración se reduce al mínimo. A lo largo de los años, se han desarrollado diversos nuevos diseños de la cabeza de la raqueta con el fin de maximizar el tamaño del punto dulce. En la fabricación de la cabeza de la raqueta suele usarse un material compósito rígido, típicamente con fibras de grafito de alto módulo en una matriz epóxica (vea el capítulo 9). La orientación de las fibras varía en los distintos puntos de la raqueta. Por ejemplo, el tubo principal consta de epoxy preimpregnado de carbono, orientado a $\pm 30^\circ$ entre capa y capa.

Las ventajas de tales materiales resultan evidentes en que las raquetas rígidas permiten la aplicación de fuerzas más altas sobre la pelota. Sin embargo, el uso de estos materiales avanzados ha conducido a un aumento de la frecuencia en la lesión denominada codo de tenista, una condición dolorosa asociada con los tendones que ancla los músculos a los huesos en el codo. La lesión se debe no sólo a las fuerzas superiores involucradas, sino también a la mayor vibración de la raqueta asociada con cada golpe, especialmente cuando las pelotas son golpeadas lejos del punto dulce.

Un diseño innovador para una raqueta, el Protector (hecho por Head Sport AG) utiliza fibras de titanato zirconato de plomo (PZT) como una capa integral de los marcos compósitos de la raqueta. El PZT es bien conocido como un material piezoeléctrico (vea la sección 3.7); es decir, que produce una respuesta eléctrica cuando se deforma. Los módulos de fibra, llamados Intellifibers®, se integran en la garganta por todos los lados de la raqueta; es decir, a la izquierda, a la derecha, adelante y atrás. El módulo consta de alrededor de 50 fibras PZT, cada una de aproximadamente 0.3 mm de diámetro, insertadas entre dos capas de poliamida con electrodos impresos para generar diferencia de potencial cuando las fibras se curvan.

Durante el impacto, la vibración constante estimula los Intellifibers generando un potencial de muy alto voltaje, pero con baja corriente. La energía se almacena en bobinas instaladas en una tarjeta de circuitos impresos (Chipsystem®) incorporada en el mango de la raqueta en tiempo real, luego se libera de nuevo hacia los Intellifibers, en la fase óptima y en forma de onda para obtener un amortiguamiento más eficiente.

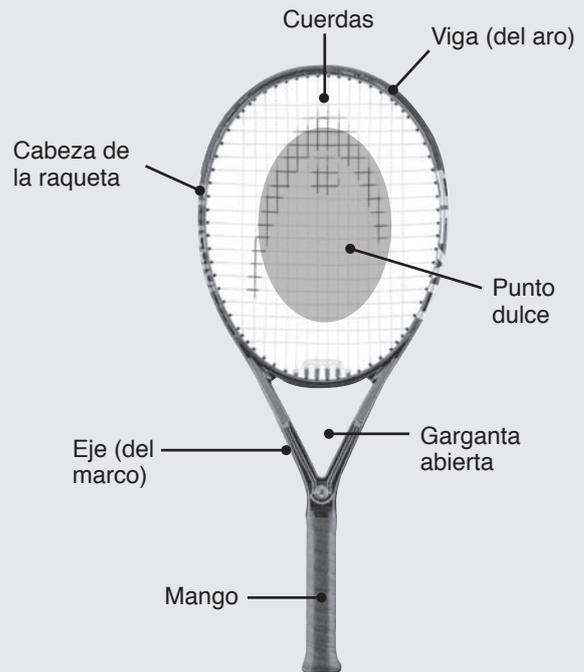


FIGURA 19.30 Raqueta de tenis Head Protector. Fuente: Cortesía de Head Sport AG.

La energía almacenada se envía de nuevo a los Intellifibers en una fase que provoca una fuerza mecánica opuesta a la vibración, la cual se reduce. El Chipsystem se ajusta a la primera frecuencia natural de la raqueta y puede amortiguar las vibraciones sólo dentro de un rango de frecuencia de diseño.

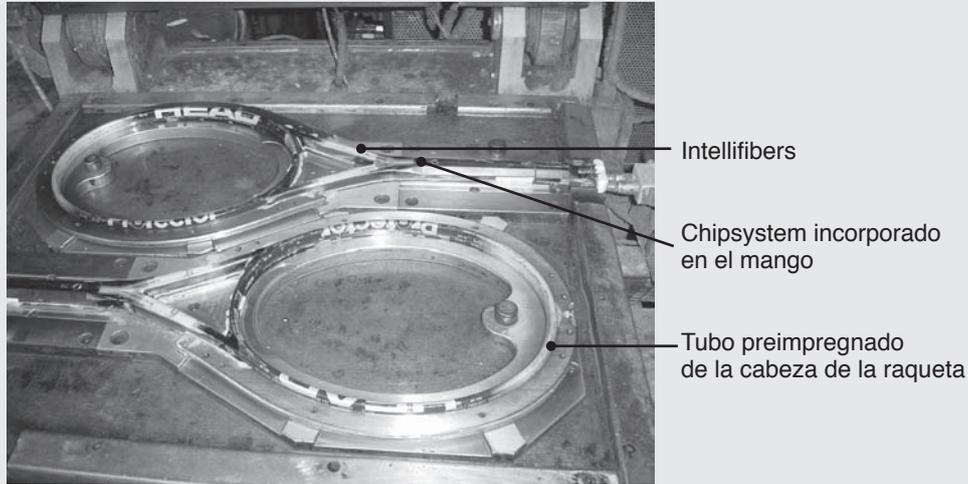
La manufactura de una raqueta de tenis Protector implica una serie de pasos. Primero se produce un material epóxico preimpregnado de carbono, como se describe en la sección 19.13.1. El preimpregnado se corta al tamaño apropiado y se coloca en una prensa plana calentada para que el material de la matriz sea más adhesivo, lo que resulta en una mejor adherencia a las capas adyacentes. Después, se coloca una camisa (o manga) de poliamida sobre una barra y el material preimpregnado se enrolla sobre la manga. Cuando se retira la barra, el resultado es un tubo de material epóxico preimpregnado de carbono con una manga de poliamida que puede colocarse en un molde y presurizarse internamente para desarrollar la sección transversal deseada.

La pieza de la garganta se moldea por separado al envolver preimpregnado alrededor de preformas de poliamida llenas de arena o espuma expandible. Como no

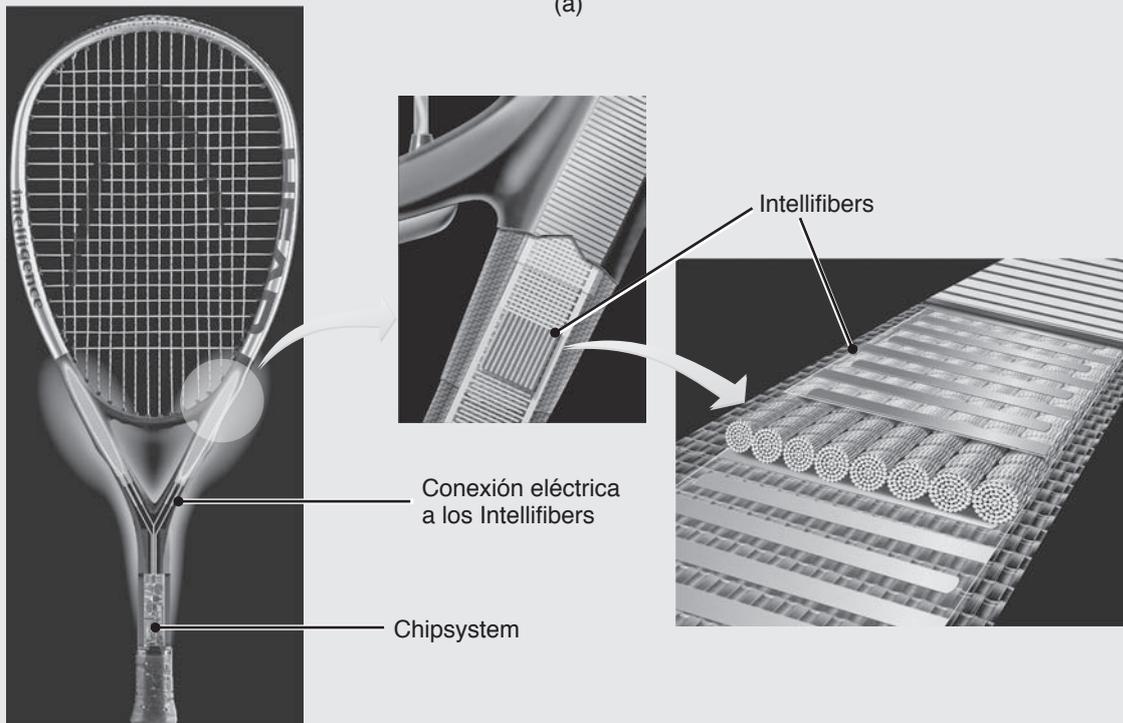
(continúa)

hay una manera fácil de proporcionar presión de aire a la garganta, la preforma desarrolla su propia presurización interna debido a la expansión del aire durante la exposición a temperaturas de moldeo elevadas. Cuando se utiliza arena, es eliminada mediante la perforación de orificios en la preforma durante la operación de acabado.

Antes del moldeo, todos los componentes se ensamblan en una plantilla y las piezas preimpregnadas finales se añaden en áreas estratégicas. El tubo principal se dobla alrededor de la plantilla y los extremos se presionan entre sí y se envuelven con una capa de preimpregnado para formar el mango. Las fibras de PZT se incorporan como la capa exterior de la raqueta en



(a)



(b)

FIGURA 19.31 (a) Raqueta Head Protector de material compuesto, inmediatamente después del moldeo, y (b) una raqueta Head Protector terminada, destacando la incorporación de Intellifibers piezoeléctricos. Fuente: Cortesía de J. Kotze y R. Schwenger, Head Sport AG.

el área de la garganta y los electrodos impresos se conectan al Chipsystem. Entonces, la raqueta se coloca en el molde, se presuriza internamente y se deja curar. Note que esta operación resulta esencialmente en un proceso de moldeo por bolsa a presión internamente presurizada (vea la figura 19.26b). En la figura 19.31a se muestra una raqueta como luce después del moldeo.

Posteriormente, la raqueta se somete a una serie de operaciones de acabado que incluyen eliminación de rebabas, perforación de orificios para introducir las cuer-

das y el acabado del mango, el cual incluye su envoltura con un material especial de agarre. En la figura 19.31b se muestra una raqueta Head Protector terminada. Se ha encontrado que este diseño reduce las vibraciones de la raqueta hasta en 50%, lo que resulta en una reducción clínicamente probada de la lesión codo de tenista sin comprometer el rendimiento.

Fuente: Cortesía de J. Kotze y R. Schwenger, Head Sport AG.

19.14 Procesamiento de compósitos de matriz metálica y cerámica

Los compósitos de matriz metálica pueden fabricarse en piezas de forma casi neta mediante los siguientes procesos:

- El **procesamiento en fase líquida** consiste básicamente en la fundición conjunta del material líquido de la matriz (como aluminio o titanio) y el refuerzo sólido (como grafito, óxido de aluminio o carburo de silicio) mediante procesos de fundición convencionales o moldeo por inyección e infiltración. En este último proceso, el gas a presión fuerza a la matriz de metal líquido a entrar en una preforma, por lo general en forma de alambre o lámina y hecha a partir de fibras de refuerzo.
- El **procesamiento en fase sólida** utiliza técnicas de metalurgia de polvos (capítulo 17), incluyendo el prensado isostático en frío y en caliente. La mezcla adecuada es importante para la distribución homogénea de las fibras en toda la pieza. Un ejemplo es la producción de herramientas y dados de carburo de tungsteno, con el cobalto como material de la matriz.
- El **procesamiento en dos fases (líquida y sólida)** implica tecnologías que consisten en reofundición (sección 11.4.7) y las técnicas de *atomización por aspersión* y *deposición*. En los dos últimos procesos, las fibras de refuerzo se mezclan con una matriz que contiene fases tanto líquidas como sólidas del metal.

En la fabricación de piezas complejas de material compuesto con matriz metálica y refuerzo de triquitas o fibras, la geometría de la matriz y el control de las variables del proceso son muy importantes para asegurar la distribución adecuada y la orientación de las fibras dentro de la pieza. Por lo general, las piezas de material compuesto con matriz metálica hechas mediante técnicas de metalurgia de polvos se tratan térmicamente para obtener las propiedades óptimas.

CASO DE ESTUDIO 19.3 Rotores de freno y camisas de cilindro hechos de material compuesto de matriz metálica

Algunos rotores de freno están hechos de materiales compósitos que constan de una matriz a base de aluminio reforzada con 20% de partículas de carburo de silicio. Primero, las partículas se revuelven en aleaciones de aluminio fundido y la mezcla se moldea en lingotes. Después, los lingotes se vuelven a fundir y se moldean

en formas mediante procesos de fundición en arena verde, arena aglutinada con adhesivo, revestimiento, molde permanente y a presión. Estos rotores (a) tienen alrededor de la mitad del peso de los que se hacen con hierro fundido gris, (b) conducen el calor tres veces más rápido, (c) añaden la rigidez y la resistencia al

(continúa)

desgaste características de los cerámicos y (d) reducen el ruido y las vibraciones gracias al amortiguamiento interno incluido en los rotores.

Para mejorar la resistencia al desgaste y al calor de las camisas para cilindro de hierro fundido en los blo-

ques de motor de aluminio, también están disponibles los revestimientos de matriz de aluminio. La capa de matriz metálica se compone de 12% de fibra de óxido de aluminio y 9% de fibra de grafito, además tiene un espesor que oscila entre 1.5 y 2.5 mm (0.06 y 0.1 pulg).

19.14.1 Procesamiento de compósitos de matriz cerámica

Existen diversos procesos, incluyendo técnicas como la infiltración en estado fundido, la oxidación controlada y el prensado en caliente por sinterizado, que se utilizan para hacer compósitos de matriz cerámica, otros procesos son:

- La **infiltración de barbotina** es el proceso más común para la fabricación de compósitos de matriz cerámica. Se trata de la preparación de una preforma de fibra que primero se prensa en caliente y luego se impregna con una combinación de suspensión (que contiene el polvo de la matriz), un líquido portador y un aglutinante orgánico. Mediante este proceso se obtiene alta resistencia, tenacidad y una estructura uniforme, pero el producto tiene propiedades limitadas a temperaturas altas. Una mejora adicional en la infiltración de barbotina es la *unión por reacción* o el *sinterizado por reacción* de la suspensión.
- Los procesos de **síntesis química** implican las técnicas sol-gel y de polímero precursor. En el *proceso sol-gel*, un *sol* (fluido coloidal con el líquido como su fase continua) que contiene fibras se convierte en un *gel*, el cual después se somete a un tratamiento térmico para producir un compósito de matriz cerámica. El *método de polímero precursor* es análogo al proceso utilizado en la fabricación de fibras cerámicas con óxido de aluminio, nitruro de silicio y carburo de silicio.
- En la **infiltración de vapor químico**, una preforma de fibra porosa se infiltra con la fase de la matriz utilizando la técnica de deposición de vapor químico (sección 34.6). El producto tiene muy buenas propiedades a temperaturas elevadas, pero el proceso es lento y costoso.

19.15 Consideraciones de diseño

Las consideraciones de diseño en el formado y en los procesos para dar forma que atañen a los plásticos son similares a las de la fundición de metales (sección 12.2). La selección de materiales apropiados a partir de una extensa lista requiere considerar (a) los requisitos del servicio, (b) los posibles efectos a largo plazo sobre las propiedades y el desempeño, como la estabilidad dimensional y el desgaste, y (c) la eliminación final del producto después de su ciclo de vida útil. (Algunos de estos temas se describen en las secciones I.4 e I.6 en la introducción general, además en la sección 7.8).

A continuación se describen los lineamientos generales de diseño para la producción de piezas de plástico y materiales compósitos.

1. Los procesos para los plásticos tienen una flexibilidad inherente, por lo tanto, es posible producir una amplia variedad de formas y tamaños de pieza. Se pueden fabricar piezas complejas con características internas y externas con relativa facilidad y a altas tasas de producción. En consecuencia, un procedimiento como el moldeo por inyección compite bien con el moldeo por inyección de polvos y la fundición por inyección en molde. Todos son capaces de producir formas complejas con paredes delgadas. En las sustituciones de procesos, resulta esencial tener en cuenta los materiales implicados y sus características, las cuales pueden ser muy diferentes, cada uno de los cuales posee propiedades particulares que son cruciales para un método particular de producción.
2. En comparación con los metales, los plásticos tienen mucha menor rigidez y resistencia, por lo que el tamaño, la forma y el espesor de la sección deben seleccionarse en

consecuencia. Dependiendo de la aplicación, se puede lograr un módulo de sección alto con base en los principios comunes de diseño para vigas I y tubos. Las superficies planas y grandes pueden reforzarse por medios sencillos como la especificación de curvaturas en las piezas; por ejemplo, observe la rigidez de las muy delgadas tablillas, pero suavemente curvadas, en las persianas venecianas. El refuerzo con fibras o partículas también resulta efectivo para el logro de diseños rígidos y ligeros.

3. A menudo, la forma general y el espesor de la pieza determinan el proceso de formado o moldeo particular que debe seleccionarse. Incluso después de elegir un proceso en particular, el diseño de las piezas y los moldes, el control dimensional y el acabado superficial deben ser los apropiados para la generación de una forma específica (figura 19.32). Debido a la baja rigidez y a los efectos térmicos, las tolerancias dimensionales, especialmente para los termoplásticos, no son tan pequeñas como en los procesos de trabajo con metales. Por ejemplo, las tolerancias dimensionales son mucho más pequeñas en el moldeo por inyección de lo que son en el termoformado. Así como sucede con los metales y las aleaciones fundidas, el control del flujo de material en las cavidades del molde es importante. Los efectos de la orientación molecular durante el procesamiento del polímero también deben tenerse en cuenta, sobre todo en la extrusión, el termoformado y el moldeo por soplado.
4. Deben evitarse grandes variaciones en las áreas de sección transversal y en los espesores de la sección, así como cambios abruptos en la geometría. Por ejemplo, note que las *marcas de hundimiento* (jalones) mostradas en la pieza superior de la figura 19.32c son debidas al hecho de que las secciones gruesas de una pieza se solidifican al final. Por otra parte, contracciones más grandes en las secciones transversales durante el enfriamiento tienden a causar *porosidad* en las piezas de plástico, como lo hacen en las fundiciones de metal (vea la figura 12.2), lo que afecta la integridad y la calidad del producto. Por el contrario, una falta de rigidez puede volver más difícil el retiro de piezas delgadas de los moldes después de darles forma.
5. El bajo módulo de elasticidad de los plásticos requiere, además, que las formas puedan seleccionarse adecuadamente para mejorar la rigidez del componente (figura 19.32b), particularmente cuando el ahorro de material es un factor importante. Tenga en cuenta que estas consideraciones son similares a las aplicables en el diseño de piezas de fundición de metal y piezas forjadas, como la necesidad de ángulos de salida (por lo general de menos de 1° para los polímeros) con el fin de permitir el retiro de la pieza de los moldes y dados. Por lo común, el espesor recomendado de la pieza varía desde aproximadamente 1 mm (0.04 pulg) para las piezas pequeñas hasta alrededor de 3 mm (0.12 pulg) para las piezas grandes.
6. Las propiedades físicas, especialmente un alto coeficiente de dilatación térmica, son factores importantes. El diseño inadecuado de la pieza puede conducir a una contracción irregular (figura 19.32a) y a distorsión (ondulaciones). Los plásticos

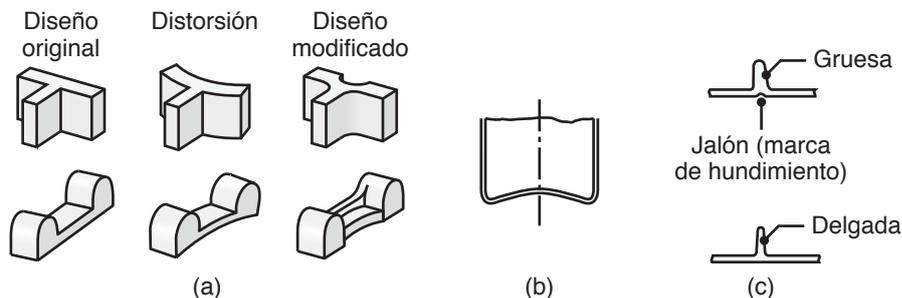


FIGURA 19.32 Ejemplos de modificaciones de diseño para eliminar o minimizar la distorsión en piezas de plástico: (a) cambios de diseño sugeridos para minimizar la distorsión; (b) incremento en la rigidez de los fondos de recipientes de plástico delgados mediante el diseño de domos, una técnica similar al proceso utilizado para formar las partes inferiores de las latas de bebidas hechas de aluminio (vea la figura 16.31); (c) cambio de diseño en una costilla para minimizar el jalón (*marca de hundimiento*) causado por la contracción durante el enfriamiento de las secciones gruesas de una pieza moldeada.

pueden moldearse fácilmente alrededor de piezas e insertos metálicos; sin embargo, su resistencia entre las superficies de contacto y su compatibilidad con los metales cuando se ensamblan de esta manera es una consideración importante.

7. Las propiedades del producto final dependen del material original y de su historia de procesamiento. Por ejemplo, el trabajo en frío de los polímeros mejora su resistencia y tenacidad. Por otro lado, debido a la falta de uniformidad en la deformación, incluso en un simple laminado, se desarrollan esfuerzos residuales en los polímeros, tal como ocurre en los metales. Estos esfuerzos también pueden deberse al ciclo térmico de la pieza durante el procesamiento. La magnitud y la dirección de los esfuerzos residuales, producidos de cualquier forma, son factores importantes; por ejemplo, para el agrietamiento por esfuerzo a lo largo del tiempo. Además, estos esfuerzos pueden relajarse luego de un periodo y causar la distorsión de la pieza durante su vida de servicio.
8. Una ventaja importante del diseño de plásticos reforzados es la naturaleza direccional de la fuerza del material compuesto (vea, por ejemplo, la figura 9.7). Las fuerzas externas aplicadas a la pieza se transfieren a través de la matriz hacia las fibras, que son mucho más resistentes y rígidas que la matriz. Cuando todas las fibras están orientadas en una dirección, el material compuesto resultante es excepcionalmente resistente en la dirección de la fibra, pero débil en la dirección transversal. Para lograr resistencia en las dos direcciones principales, se colocan capas unidireccionales individuales en ángulos controlados entre sí, como se hace en el devanado de filamentos. Cuando se requiere resistencia en una tercera dirección (espesor), se utiliza un tipo diferente de refuerzo, como fibra tejida, para formar una estructura de sándwich.

19.16 Economía del procesamiento de plásticos y materiales compósitos

Las características generales del procesamiento de plásticos y materiales compósitos se listan en la tabla 19.2. Observe el amplio rango de costos de equipo y herramienta y las cantidades económicas de producción. Como se describió en este capítulo, se observará que existe cierta relación entre los costos de equipo y los costos de herramientas y moldes.

Las máquinas más caras son para el moldeo por inyección, seguidas por el moldeo por compresión y el moldeo por transferencia, los costos de herramientas y moldes también son altos para estas operaciones. Por lo tanto, en una operación como el moldeo por

TABLA 19.2

Comparativo de las características de producción para diversos métodos de moldeo

Método de moldeo	Costo de equipo y herramienta*	Tasa de producción*	Cantidad económica de producción*
Extrusión	M-B	MA-A	MA
Moldeo por inyección	MA	MA	MA
Rotomoldeo	M	M-B	M
Moldeo por soplado	M	A-M	A
Moldeo por compresión	A-M	M	A-M
Moldeo por transferencia	A	M	MA
Termoformado	M-B	M-B	A-M
Colado	M-B	M-B	B
Fundición centrífuga	A-M	M-B	M-B
Pultrusión	A-M	A	A
Devanado de filamentos	A-M	B	B
Colocación manual y por aspersión	B-MB	B-MB	B

*MA = muy alto; A = alto; M = medio; B = bajo; MB = muy bajo.

inyección, el tamaño del molde y el número óptimo de cavidades presentes en éste para la producción de más y más piezas en un ciclo son consideraciones importantes; de igual modo que lo son en una operación como la fundición por inyección en molde. Se pueden considerar moldes más grandes con el fin de incluir varias cavidades (con canales de alimentación hacia cada cavidad), pero a costa de aumentar el costo del molde aún más. Por otro lado, se producirán más piezas por ciclo en la máquina, con lo que se incrementará la tasa de producción.

Por consiguiente, se requiere un análisis detallado para determinar el tamaño global del molde, el número de cavidades y la capacidad requerida de la máquina para optimizar la operación total y producir piezas a un costo mínimo. Para todos los demás métodos de procesamiento descritos en este capítulo, se aplican consideraciones similares.

RESUMEN

- A los termoplásticos se les puede dar forma mediante una variedad de procesos, incluyendo extrusión, moldeo, colado y termoformado, así como por medio de algunos de los procesos utilizados en la metalurgia. La materia prima suele tener forma de pellet, partículas o polvos.
- La alta sensibilidad a la velocidad de deformación en los termoplásticos permite un extenso estiramiento en las operaciones de formado, por lo que pueden producirse piezas complejas y profundas con facilidad. Por lo general, los plásticos termofijos se moldean o se cuelan y tienen mayor precisión dimensional que el formado de termoplásticos.
- Los plásticos reforzados con fibras se procesan en componentes estructurales utilizando plásticos líquidos, productos preimpregnados y compósitos volumétricos y moldeados en láminas. Las técnicas de fabricación incluyen diversos métodos de moldeo, devanado de filamentos, pultrusión y pulformado. El tipo y la orientación de las fibras y la resistencia de la unión entre las fibras y la matriz, así como entre las capas de material, son consideraciones importantes.
- El diseño de piezas de plástico debe tener en cuenta su baja resistencia y rigidez, también propiedades físicas como la alta dilatación térmica y la generalmente baja resistencia a la temperatura. Existen técnicas de inspección disponibles para determinar la integridad de estos productos.
- El procesamiento de compósitos de matriz metálica y matriz cerámica sigue experimentando avances significativos para asegurar la integridad del producto, su confiabilidad y la reducción de costos. Los compósitos de matriz metálica se trabajan mediante procesos en fase líquida, en fase sólida y en dos fases. Los materiales compósitos de matriz cerámica pueden procesarse por infiltración de barbotina, síntesis química o infiltración de vapor químico.
- Los factores relevantes en la economía de las operaciones descritas incluyen los costos de maquinaria, el nivel de control, las herramientas, los tiempos de ciclo, así como la tasa y el volumen de producción.

TÉRMINOS CLAVE

Calandrado	Compuesto de moldeo de láminas	Dado de percha recubierta	Formado en fase sólida
Coextrusión	Compuesto de moldeo grueso	Devanado de filamentos	Formado en frío
Colado	Compuesto de moldeo volumétrico	Encapsulado	Hilado
Colocación manual		Encolado	Hilado por fusión
Colocación por aspersión		Extrusión	Hilador

Hinchamiento	Moldeo por bolsa al vacío	Moldeo rotacional (rotomoldeo)	Pulformado
Infiltración de barbotina	Moldeo por compresión	Pellet	Pultrusión
Infiltración de vapor químico	Moldeo por contacto	Plastisol	Relación de soplado
Marcas de hundimiento	Moldeo por extrusión soplado	Preforma	Rellenado
Masticado	Moldeo por inyección	Preimpregnados	Síntesis química
Moldeo con insertos	Moldeo por inyección reacción	Procesamiento a molde abierto	Sobremoldeo
Moldeo de espuma	Moldeo por soplado	Procesamiento en dos fases	Termoformado
Moldeo de espuma estructural	Moldeo por transferencia	Procesamiento en fase líquida	
Moldeo en hielo	Moldeo por transferencia de resina	Procesamiento en fase sólida	
Moldeo en hueco			

BIBLIOGRAFÍA

- Campbell, F., *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Elsevier, 2004.
- Chanda, J. M. y Roy, S. K., *Plastics Technology Handbook*, 4a. ed., CRC Press, 2006.
- Dave, R. S. y Loos, A. C., *Processing of Composites*, Hanser Gardner, 2000.
- Gerdeen, J. C., Lord, H. W. y Rorrer, R. A. L., *Engineering Design with Polymers and Composites*, CRC Press, 2006.
- Gordon, Jr., M. J., *Industrial Design of Plastics Products*, Wiley, 2002.
- Harper, C., *Handbook of Plastics, Elastomers & Composites*, 4a. ed., McGraw-Hill, 2002.
- Harper, C., *Handbook of Plastics Technologies: The Complete Guide to Processes and Performance*, 2a. ed., McGraw-Hill, 2006.
- Johnson, P. S., *Rubber Processing: An Introduction*, Hanser Gardner, 2001.
- Kutz, M., *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*, William Andrew, 2011.
- Mallick, P. K. (ed.), *Fiber-reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, 3a. ed., Dekker, 2008.
- Mazumdar, S. K., *Composites Manufacturing: Materials, Products and Process Engineering*, CRC Press, 2001.
- Strong, A. B., *Fundamentals of Composites Manufacturing*, 2a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 2007.
- Strong, A. B., *Plastics: Materials and Processing*, 3a. ed., Prentice Hall, 2005.
- Tadmor, Z. y Gogos, C. G., *Principles of Polymer Processing*, 2a. ed., Wiley, 2006.

PREGUNTAS DE REPASO

- 19.1** ¿Cuáles son las formas de materia prima disponibles para el procesamiento de plásticos en productos?
- 19.2** ¿Qué es la extrusión? ¿Qué productos se producen por extrusión de polímeros?
- 19.3** Describa las características de un tornillo extrusor y sus funciones.
- 19.4** ¿Cómo se clasifican las máquinas de moldeo por inyección?
- 19.5** ¿Qué es (a) una preforma, (b) un plastisol y (c) un material preimpregnado?
- 19.6** ¿Cómo se produce una película delgada de plástico?
- 19.7** Liste diversos productos comunes que puedan hacerse por termoformado.
- 19.8** ¿Qué similitudes y diferencias hay entre el moldeo por compresión y el forjado a molde cerrado?
- 19.9** Explique la diferencia entre rellenado y encapsulado.
- 19.10** ¿Qué es el termoformado?
- 19.11** Describa canal de alimentación, compuerta, bebedero y pozo.
- 19.12** Describa las ventajas del formado de plásticos en frío con respecto a otros métodos empleados para el procesamiento de plásticos.
- 19.13** ¿Cuáles son las características de los productos del devanado de filamentos? Explique por qué son deseables.
- 19.14** Describa los métodos que pueden utilizarse para fabricar productos de plástico tubulares.
- 19.15** ¿Qué es la pultrusión? ¿Qué es el pulformado?
- 19.16** ¿Cómo se produce una película de plástico muy delgada?
- 19.17** ¿Qué proceso se utiliza para fabricar tazas para bebidas a partir de espuma?
- 19.18** Si un polímero tiene la forma de una lámina delgada, ¿es un termoplástico o un termofijo? ¿Por qué?
- 19.19** ¿Cómo se hacen las fibras de polímero? ¿Por qué son mucho más fuertes que las formas volumétricas de polímero?
- 19.20** ¿Cuáles son las ventajas de la coextrusión?
- 19.21** Explique cómo se hacen los guantes de goma de látex.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 19.22** Describa las características de un extrusor de tornillo y sus funciones.
- 19.23** Explique por qué el moldeo por inyección es capaz de producir piezas con formas complejas y detalles finos.
- 19.24** Describa las ventajas de aplicar las técnicas tradicionales para el formado de metales, descritas en los capítulos 13 a 16, en la fabricación de productos (a) termoplásticos y (b) termofijos.

19.25 Explique las razones por las que algunos procesos para el formado de plásticos son más adecuados para ciertos polímeros que para otros. Dé ejemplos.

19.26 Describa los problemas que implica el reciclaje de productos hechos a partir de plásticos reforzados.

19.27 ¿Los plásticos termofijos pueden usarse en el moldeo por inyección? Explique su respuesta.

19.28 Inspeccione algunos envases de plástico, como los que contienen talco en polvo, y observe que las letras integradas en ellos están realizadas en vez de hundidas. Explique esta característica.

19.29 Se encontró que un engrane de nailon moldeado por inyección contenía pequeños poros. Se recomienda que el material esté seco antes de moldearlo. Explique por qué el secado resolvería este problema.

19.30 Explique por qué las operaciones como el moldeo por soplado y la fabricación de bolsas de película se realizan verticalmente.

19.31 Comente el principio del funcionamiento de la máquina de colocación de cinta que se muestra en la figura 19.24b.

19.32 En la tabla 19.2 se listan algunas tasas de producción típicas. Comente sobre sus observaciones y explique por qué hay un rango tan amplio.

19.33 ¿Qué determina el tiempo de ciclo para (a) el moldeo por inyección, (b) el termoformado y (c) el moldeo por compresión? Explique su respuesta.

19.34 ¿El defecto de jalón (marcas de hundimiento) que se muestra en la figura 19.32c también se produce en los procesos de formado de metales y fundición? Explique su respuesta.

19.35 ¿Qué determina los intervalos en los que el cabezal de indexación de la figura 19.14c gira de una estación a otra?

19.36 Identifique los procesos que serían adecuados para pequeñas corridas de producción, por ejemplo de 100 piezas de plástico.

19.37 Identifique procesos que serían capaces de producir artículos con las siguientes orientaciones de fibra en cada pieza: (a) uniaxial, (b) cruzada entre capas, (c) aleatoria en el plano y (d) aleatoria tridimensional.

19.38 Inspeccione diversos componentes eléctricos, como interruptores de luz, tomacorrientes e interruptores de circuito, y describa el o los procesos utilizados en su elaboración.

19.39 Inspeccione diversos productos similares que estén hechos a partir de metales y plásticos, por ejemplo una cubeta de metal y una cubeta de plástico con formas y tamaños semejantes. Comente sobre sus respectivos espesores y explique las razones de sus diferencias, si las hubiese.

19.40 ¿Cuáles son las ventajas de utilizar triquitas como material de refuerzo?

19.41 Construya una tabla que liste los principales procesos de manufactura descritos en este capítulo. Indique los que pueden utilizarse con materiales (a) termoplásticos, (b) termofijos y (c) compósitos.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

19.42 Estime la fuerza de cierre requerida para el moldeo por inyección de cinco discos idénticos con 8 pulg de diámetro en un molde. Incluya la longitud y el diámetro apropiado de los canales de alimentación.

19.43 Una botella de plástico para bebidas con capacidad de 2 litros se fabrica mediante el moldeo por soplado de una preforma con 5 pulg de largo y un diámetro que es igual al del cuello roscado de la botella. Suponiendo una deformación uniforme durante el moldeo, estime el espesor de pared de la porción tubular de la preforma.

19.44 Considere un vaso para beber hecho a partir de espuma de poliestireno. Mida el volumen del vaso y su peso. A partir de esta información, calcule el porcentaje de incremento en volumen al que se han sometido las partículas de poliestireno.

19.45 En la figura 19.2, ¿qué ángulo de filete, θ , debe utilizarse de manera que un filete se traduzca en una distancia igual al diámetro del barril con cada revolución?

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

19.46 Revise toda una variedad de materiales deportivos, como bicicletas, raquetas de tenis, palos de golf y bates de béisbol, e identifique los componentes hechos con materiales compósitos. Explique las razones y las ventajas del uso de materiales compósitos en estas aplicaciones específicas.

19.47 Explique las consideraciones de diseño involucradas en la sustitución de una lata metálica para bebidas por una lata hecha completamente de plástico.

19.48 Proporcione ejemplos de varias piezas apropiadas para el moldeo con insertos. ¿Cómo se fabricarían estas piezas si el moldeo con insertos no estuviera disponible?

19.49 Proporcione otros ejemplos de modificaciones de diseño, además de las mostradas en la figura 19.32.

19.50 Con ejemplos concretos, analice las consideraciones de diseño que intervienen en la fabricación de productos de plástico contra los plásticos reforzados.

19.51 En la extrusión, el hinchamiento del plástico a la salida del molde es radialmente uniforme para secciones circulares, pero no es uniforme para otras secciones transversales. Reconociendo este hecho, trace un esquema cualitativo de un perfil de molde que producirá secciones transversales de polímero extruido (a) cuadradas, (b) triangulares, (c) elípticas y (d) en forma de engrane.

19.52 Inspeccione diferentes componentes de plástico instalados en un automóvil típico e identifique los procesos que podrían haber sido utilizados en su elaboración.

19.53 Escriba un breve documento sobre cómo se aplican los revestimientos de plástico para (a) cableado eléctrico; (b) paneles de lámina metálica; (c) cestas y anaqueles de alambre, y estructuras similares, y (d) mangos para herramientas de electricista, como los cortadores de alambre y pinzas que requieren aislamiento eléctrico.

19.54 Es bien sabido que tenedores, cucharas y cuchillos de plástico no son particularmente rígidos. ¿Qué sugerencias tiene usted para mejorarlos? Describa los procesos que podrían utilizarse para producirlos.

19.55 Algunos productos de plástico tienen tapas con bisagras integradas; es decir, no se utiliza ningún otro material o pieza para la unión de las dos partes. Identifique este tipo de productos y describa un método para su fabricación.

19.56 Busque en la literatura técnica y describa cómo se fabrican los diferentes tipos de (a) neumáticos, (b) mangueras automotrices y (c) mangueras de jardín.

19.57 Obtenga un juego de los empaques utilizados para el ensamble de un modelo de automóvil o avión. Examine las piezas moldeadas por inyección proporcionadas y describa sus ideas sobre el diseño de los moldes usados para producirlas.

19.58 En las operaciones de moldeo por inyección, es una práctica común retirar la pieza de sus sistemas de alimentación, colocar estos sistemas en una trituradora y reciclarlos mediante la producción de pellet. Liste las preocupaciones que podría acarrear el uso de este tipo de pellet reciclado en otros productos, comparado con pellet virgen.

19.59 Una creciente preocupación ambiental es el muy largo plazo que requieren los polímeros para degradarse en los vertederos. Considerando la información dada en la sección 7.8 sobre los plásticos biodegradables, realice una búsqueda en la literatura sobre las tendencias y la evolución de la producción de estos plásticos.

19.60 Examine algunas coloridas fichas de plástico comunes usadas para jugar póquer y dé una opinión sobre la forma en que fueron fabricadas.

19.61 Obtenga tubos de pasta de dientes en diferentes estilos, córtelos cuidadosamente en forma transversal y comente sus observaciones con respecto a (a) el tipo de material utilizado y (b) cómo se produjeron los tubos.

19.62 Mediante la incorporación de pequeñas cantidades de agentes insuflantes, es posible fabricar fibras de polímero con núcleos de gas. Haga una lista de algunas aplicaciones de dichas fibras.

Procesos y operaciones del prototipado rápido

CAPÍTULO 20

- En este capítulo se describen las tecnologías asociadas con el prototipado rápido, las cuales comparten características como integración de la computadora, producción sin el uso de herramientas y dados tradicionales y capacidad de producir rápidamente una sola pieza sobre demanda; todas tienen las características básicas de la producción de piezas individuales capa por capa.
- El capítulo describe los materiales no metálicos y metálicos utilizados en el prototipado rápido y cubre las tecnologías de prototipado rápido con importancia comercial, incluyendo el modelado por deposición fundida, la estereolitografía, el modelado Polyjet, la impresión en tres dimensiones y el sinterizado selectivo mediante láser.
- El capítulo termina con una descripción de la práctica de aplicar técnicas de prototipado rápido a la producción de herramientas que puedan utilizarse en otros procesos de manufactura.

Piezas comunes que se fabrican: una amplia variedad de piezas metálicas y no metálicas para análisis del diseño del producto, evaluación y productos terminados.

Procesos alternativos: maquinado, fundición, moldeo y fabricación.

20.1	Introducción	535
20.2	Procesos sustractivos	538
20.3	Procesos aditivos	540
20.4	Prototipado virtual	551
20.5	Máquinas autorreplicantes	552
20.6	Manufactura directa y creación rápida de herramientas	553

CASOS DE ESTUDIO:

20.1	Prototipado rápido funcional	536
20.2	Diseño de una cafetera	544
20.3	Producción de avatares de Second Life	547
20.4	Accesorios para el fuselaje de helicópteros	548
20.5	Alineadores ortodóncicos Invisalign®	553
20.6	Fundición de accesorios de plomería	558

20.1 Introducción

En el desarrollo de un nuevo producto, antes de asignar grandes cantidades de capital a nuevas instalaciones de producción o líneas de ensamble, invariablemente existe la necesidad de producir una muestra o **prototipo** de una pieza o sistema diseñados. Las principales razones de esta necesidad son que el requerimiento de capital es muy alto y la producción de herramientas demanda un tiempo de preparación considerable. En consecuencia, se hace necesario contar con un prototipo del trabajo para evaluar el diseño y resolver sus problemas antes de que un producto o sistema complejo esté listo para ser producido y comercializado.

En la figura I.2 de la introducción general, se describe el proceso de desarrollo típico de un producto. Un proceso iterativo se produce naturalmente cuando (a) se descubren errores o (b) se obtienen mejores o más eficientes soluciones de diseño a partir del estudio de un prototipo de la generación anterior. Sin embargo, el principal problema con este enfoque es que la producción de un prototipo puede consumir mucho tiempo. La preparación de los herramientas puede llevarse varios meses y la producción de una sola pieza compleja mediante operaciones de manufactura convencionales puede ser muy difícil. Por otra parte, durante el tiempo que se está preparando un prototipo, las instalaciones y el personal siguen generando gastos.

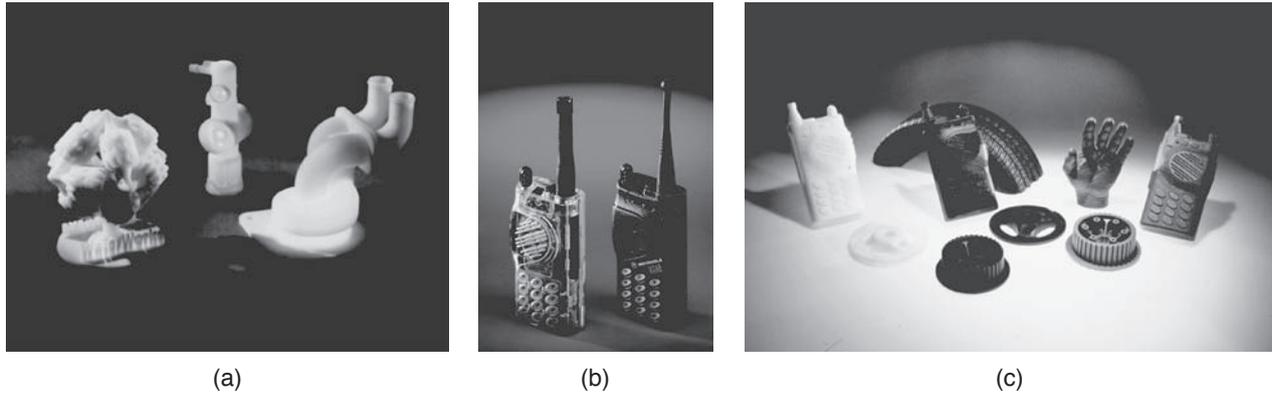


FIGURA 20.1 Ejemplos de piezas fabricadas mediante procesos de prototipado rápido: (a) selección de piezas modeladas por deposición fundida; (b) modelo estereolitográfico para un dispositivo de comunicaciones; (c) selección de piezas fabricadas por impresión tridimensional. *Fuente:* (a) Cortesía de Stratasys, Inc. (b) y (c) Cortesía de 3D Systems, Inc.



Código QR 20.1 Impresión en 3D de una llave con piezas móviles. (*Fuente:* Cortesía de Stratasys, Inc.).

Una preocupación aún más importante es la velocidad con la que un producto fluye desde el concepto hasta un artículo comercializable. En un mercado competitivo, es bien sabido que los productos introducidos antes que sus competidores suelen ser más rentables y disfrutar de mayor participación de mercado. Al mismo tiempo, existen preocupaciones importantes con respecto a la producción de artículos de alta calidad, además la introducción prematura de los productos puede arruinar una marca al ocasionar frustración asociada con un bajo desempeño o pérdida de productividad por la necesidad de realizar reparaciones y mejoras. Por estas razones, existe un esfuerzo concertado para llevar productos de alta calidad al mercado y de manera rápida.

Una tecnología que acelera considerablemente el proceso iterativo de desarrollo de productos es el concepto y la práctica del **prototipado rápido** (RP, por sus siglas en inglés), también llamado **manufactura de escritorio**, **manufactura digital** o **fabricación de sólidos con forma libre**. En la figura 20.1 se muestran ejemplos de piezas elaboradas con prototipado rápido.

CASO DE ESTUDIO 20.1 Prototipado rápido funcional

Los juguetes son ejemplos de artículos fabricados en serie que tienen atractivo universal. Debido a que algunos en realidad son muy complejos, no es posible asegurar la función y los beneficios de un diseño asistido por computadora (CAD) sino hasta que se producen prototipos. La figura 20.2 muestra un modelo CAD y una versión de prototipado rápido de una pistola de agua (la pistola de agua Super Soaker Power Pack Back Pack), la cual se produjo en una máquina de modelado por deposición fundida. Cada componente se produce por separado y se ensambla en la pistola de agua, el prototipo realmente podría contener agua y lanzar un chorro. La alternativa sería producir componentes en máquinas de fresado con control numérico por compu-

tadora (CNC, por sus siglas en inglés) o fabricar las pistolas de alguna otra manera; sin embargo, esto se puede hacer solamente a un costo mucho mayor.

Mediante la producción de un prototipo, es posible evaluar y corregir los problemas de interferencia y ensamblaje, si esto fuera necesario. Además, desde un punto de vista estético, las elaboradas decoraciones de un juguete de este tipo pueden evaluarse de manera más efectiva a partir de un prototipo que en un archivo CAD, y se pueden ajustar para mejorar el atractivo del juguete. Habiéndose comprobado el diseño de los componentes, las herramientas asociadas con cada uno se manufacturan con una mejor seguridad de que producirán las piezas deseadas y según lo ordenado.

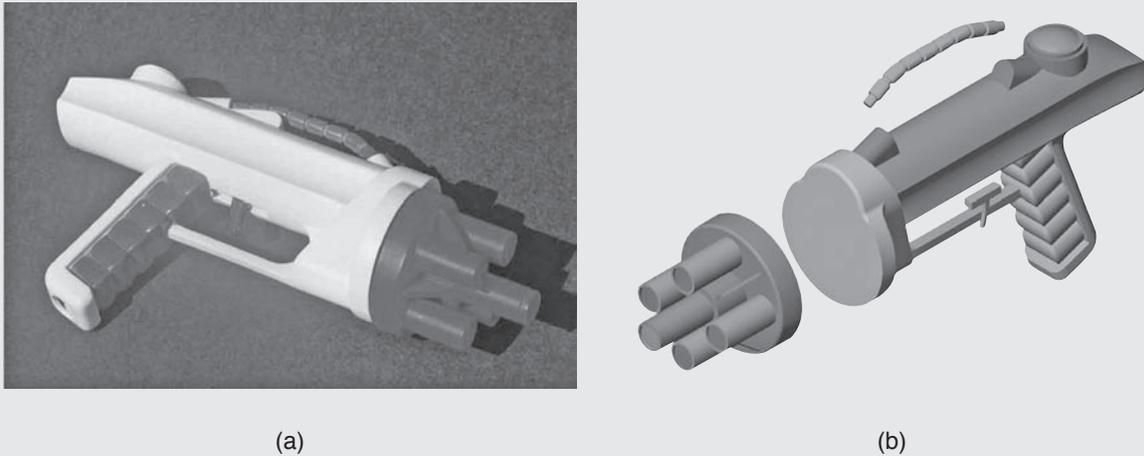


FIGURA 20.2 Prototipado rápido de una pistola de agua Super Soaker. (a) Juguete completamente funcional producido mediante modelado por deposición fundida y (b) descripción original de CAD. *Fuente:* Cortesía de Rapid Models and Prototypes, Inc., y Stratasys, Inc.

La evolución del prototipado rápido inició en la década de 1980. Las ventajas de esta tecnología incluyen:

- Los modelos físicos de piezas producidas a partir de archivos de datos CAD pueden fabricarse en cuestión de horas y, por lo tanto, permiten una rápida evaluación de la efectividad del diseño y de su manufactura. De esta forma, el prototipado rápido sirve como una importante herramienta para la visualización y verificación del concepto de producto.
- Con los materiales adecuados, el propio prototipo puede utilizarse en operaciones de manufactura posteriores para producir las piezas finales. Este enfoque, denominado también *prototipado directo*, puede servir como una importante tecnología de manufactura.
- Las operaciones del prototipado rápido pueden usarse en algunas aplicaciones con el fin de producir herramientas reales para las operaciones de manufactura (**creación rápida de herramientas**, consulte la sección 20.6.1), por lo que es posible hacer los herramientas en cuestión de unos cuantos días.

Los procesos de prototipado rápido se pueden clasificar en tres grandes grupos:

1. **Sustractivos**, eliminan material a partir de una pieza de trabajo que es más grande que la pieza final.
2. **Aditivos**, construyen una pieza mediante la adición de material en forma incremental.
3. **Virtuales**, utilizan tecnologías avanzadas de visualización basadas en computadora.

Casi todos los materiales pueden utilizarse como una pieza de trabajo mediante una o más operaciones de prototipado rápido, como se indica en la tabla 20.1. Sin embargo, debido a que sus propiedades son más adecuadas para estas operaciones, los polímeros son el material más comúnmente utilizado en la actualidad, seguidos de los metales y los cerámicos (vea la tabla 20.2). Con todo, se están introduciendo nuevos procesos en forma continua. El resto de este capítulo es una introducción general a las operaciones más comunes de prototipado rápido; se describen las ventajas y limitaciones y se exploran las aplicaciones presentes y futuras de estos procesos.

TABLA 20.1**Características de las tecnologías del prototipado rápido aditivo**

Proceso	Fase de suministro	Técnica de creación de capas	Tipo de cambio de fase	Materiales
Estereolitografía	Líquido	Curado de capa líquida	Fotopolimerización	Fotopolímeros (acrilatos, epoxy, resinas coloreables y resinas con relleno)
Modelado MultiJet/PolyJet	Líquido	Curado de capa líquida	Fotopolimerización	Fotopolímeros
Modelado por deposición fundida	Sólido	Extrusión de polímero fundido	Solidificación por enfriamiento	Polímeros (como ABS, policarbonato y polisulfona)
Manufactura de partículas balísticas	Líquido	Deposición por goteo	Solidificación por enfriamiento	Polímeros y cera
Impresión tridimensional	Polvo	Deposición por goteo de aglutinante sobre una capa de polvo	Sin cambio de fase	Cerámica, polímero, polvo metálico y arena
Sinterizado selectivo por láser	Polvo	Capa de polvo	Sinterizado o fusión	Polímeros, metales con aglutinante, metales, cerámicos y arena con aglutinante
Fusión por haz de electrones	Polvo	Capa de polvo	Fusión	Titanio y sus aleaciones, cobalto-cromo
Manufactura de objetos laminados	Sólido	Deposición de material laminado	Sin cambio de fase	Papel y polímeros
Formado neto por ingeniería láser	Polvo	Inyección de chorro de polvo	Sin cambio de fase	Titanio, acero inoxidable, aluminio

20.2 Procesos sustractivos

Tradicionalmente, hacer un prototipo ha implicado una serie de procesos usando toda una variedad de herramientas y máquinas, por lo general en un periodo que va de semanas o meses, dependiendo de la complejidad y el tamaño de la pieza. Este enfoque requiere operadores calificados y utiliza una serie de operaciones de *remoción de material por maquinado y de acabado* (tal como se describe con detalle en la parte IV) hasta completar el prototipo. Para acelerar el proceso, los procesos sustractivos utilizan cada vez más tecnologías basadas en computadora tales como:

- **Paquetes de diseño basados en computadora**, pueden producir representaciones tridimensionales de las piezas.
- **Software de interpretación**, puede traducir el archivo CAD en un formato utilizable por el software de manufactura.
- **Software de manufactura**, es capaz de planificar las operaciones necesarias para producir la forma de la pieza deseada.
- **Máquinas con control numérico por computadora (CNC)**, tienen las capacidades necesarias para producir las piezas.

Cuando se requiere un prototipo sólo para el propósito de verificar la forma, se utiliza un material blando (por lo general un polímero o una cera) como pieza de trabajo con el fin de reducir o evitar cualquier dificultad de maquinado. El material destinado a usarse en la aplicación real también puede maquinarse, pero esto puede llevar más tiempo. De acuerdo con la complejidad de la pieza y el nivel de las capacidades de maquinado que haya en una planta, los prototipos pueden producirse en un lapso que va desde pocos días

TABLA 20.2

Propiedades mecánicas de los materiales seleccionados para el prototipado rápido					
Proceso	Material	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación en 50 mm (%)	Características
Estereolitografía	Accura 60	68	3.10	5	Transparente; buen material de uso general para el prototipado rápido.
	Somos 9920	9	1.35-1.81	15-26	Ámbar transparente; buena resistencia química; buenas propiedades contra la fatiga; utilizado para la producción de modelos en el moldeo de hule.
	WaterClear Ultra	56	2.9	6-9	Resina ópticamente clara con propiedades similares al ABS.
	WaterShed 11122	47.1-53.6	2.65-2.88	11-20	Ópticamente claro con un tinte ligeramente verde; propiedades mecánicas similares a las del ABS; se utiliza para la creación rápida de herramientas.
	DMX-SL 100	32	2.2-2.6	12-28	Beige opaco; buen material de uso general para el prototipado rápido.
PolyJet	FC720	60.3	2.87	20	Ámbar transparente; buena resistencia al impacto; buena absorción de pintura y maquinabilidad.
	FC830	49.8	2.49	20	Blanco, azul o negro; buena resistencia a la humedad; adecuado para aplicaciones de propósito general.
	FC 930	1.4	0.185	218	Semiopaco, gris o negro; material muy flexible que se usa para el prototipado de polímeros blandos o hule.
Modelado por deposición fundida	Policarbonato	52	2.0	3	Blanco; polímero de alta resistencia adecuado para el prototipado rápido y uso general.
	Ultem 9085	71.64	2.2	5.9	Dorado opaco; material de FDM de alta resistencia; buen índice de flama, humo y toxicidad.
	ABS-M30i	36	2.4	4	Disponibile en varios colores, más comúnmente blanco; material resistente y duradero, adecuado para uso general; compatible con el medio ambiente.
	PC	68	2.28	4.8	Blanco; buena combinación de propiedades mecánicas y resistencia al calor.
Sinterizado selectivo por láser	WindForm XT	77.85	7.32	2.6	Poliamida y carbono negro opaco; produce piezas duraderas resistentes al calor y a los productos químicos; alta resistencia al desgaste.
	Poliamida PA 3200GF	45	3.3	6	Blanca; la poliamida rellena de vidrio tiene mayor rigidez y es adecuada para aplicaciones a temperaturas más altas.
	SOMOS 201	—	0.015	110	Disponibile en múltiples colores; imita las propiedades mecánicas del hule.
	ST-100c	305	137	10	Polvo de acero infiltrado con bronce.
Fusión por haz de electrones	Ti-6Al-4V	970-1030	120	12-16	Puede tratarse térmicamente por HIP para obtener resistencias a la fatiga de hasta 600 MPa.

hasta unas cuantas semanas. Los sistemas sustractivos pueden adoptar muchas formas; son similares en su enfoque a las celdas de manufactura que se describen en la sección 39.2. Los operadores pueden o no estar involucrados en la operación, aunque el manejo de las piezas suele ser una tarea humana.

20.3 Procesos aditivos

Todas las operaciones de prototipado rápido aditivo construyen piezas en capas y se resumen en la tabla 20.1. Tales procesos comprenden *estereolitografía*, *modelado Multi Jet/Polyjet*, *modelado por deposición fundida*, *manufactura de partículas balísticas*, *impresión tridimensional*, *sinterizado selectivo por láser*, *fusión por haz de electrones* y *manufactura de objetos laminados*. Todos los procesos descritos en esta sección *construyen las piezas capa por capa*. Con el fin de visualizar la metodología empleada, resulta benéfico pensar en la construcción de una barra de pan apilando y uniendo fragmentos individuales de pan uno sobre el siguiente (de ahí el término *aditivo*). La diferencia principal entre los diversos procesos aditivos reside en el método de producción de los cortes individuales, que suelen tener un espesor de entre 0.1 y 0.5 mm (0.004 y 0.020 pulg), aunque pueden ser más gruesos en algunos sistemas.

Todas las operaciones aditivas requieren de software especializado. Como un ejemplo, observe la pieza sólida que se muestra en la figura 20.3a. El primer paso consiste en obtener una descripción a partir del archivo CAD de la pieza, después la computadora construye cortes de la pieza tridimensional (figura 20.3b). Cada corte se analiza por separado y se compila un conjunto de instrucciones con el fin de proporcionar a la máquina de prototipado rápido información detallada relativa a la manufactura de la pieza. En la figura 20.3d se muestran las trayectorias del extrusor en un corte, se utiliza la operación de modelado por deposición fundida que se describe en la sección 20.3.1.

Este método requiere la intervención de un operador, tanto en la configuración de los archivos de computadora adecuados como en el inicio del proceso de producción. Después de esa etapa, las máquinas suelen funcionar sin supervisión y proporcionan una pieza burda después de unas pocas horas. Entonces, la pieza puede someterse a una serie de operaciones de acabado manual (como lijado y pintura) con el fin de completar el proceso de prototipado rápido.

Las operaciones de preparación y acabado requieren mano de obra muy intensiva y el tiempo de producción sólo es una parte del tiempo requerido para obtener un prototipo. Sin embargo, en general, los procesos aditivos son mucho más rápidos que los procesos sustractivos porque requieren sólo de unos pocos minutos a unas cuantas horas para producir una pieza.



Código QR 20.2 Modelado por deposición fundida. (Fuente: Cortesía de Stratasys, Inc.).

20.3.1 Modelado por deposición fundida

En el proceso de *modelado por deposición fundida* (FDM, por sus siglas en inglés) (figura 20.4), un cabezal extrusor robótico se mueve en dos direcciones principales sobre una mesa que puede elevarse o bajarse según sea necesario. El cabezal extrusor se calienta y extruye filamentos de polímero a una velocidad constante a través de un pequeño orificio. El cabezal sigue una trayectoria predeterminada (vea la figura 20.3d); el polímero extruido se pega a la capa previamente depositada. (La capa inicial se coloca en una base de espuma). Cuando se completa la primera capa, la mesa se baja de manera que las capas posteriores puedan superponerse sobre la primera capa. Cuando la pieza está terminada, puede retirarse fácilmente de la base de espuma.

Las piezas complejas, como la que se muestra en la figura 20.5a, pueden ser difíciles de construir en forma directa porque una vez que la pieza se ha construido hasta la altura a , el siguiente corte requeriría que el filamento fuese colocado en un sitio donde no existe material subyacente para soportarlo. La solución consiste en extruir un material de soporte por separado del material de modelado, como se muestra en la figura 20.5b. Note que el uso de tales estructuras de soporte permite que todas las capas estén soportadas por material depositado directamente debajo de cada capa. El material de soporte se pro-

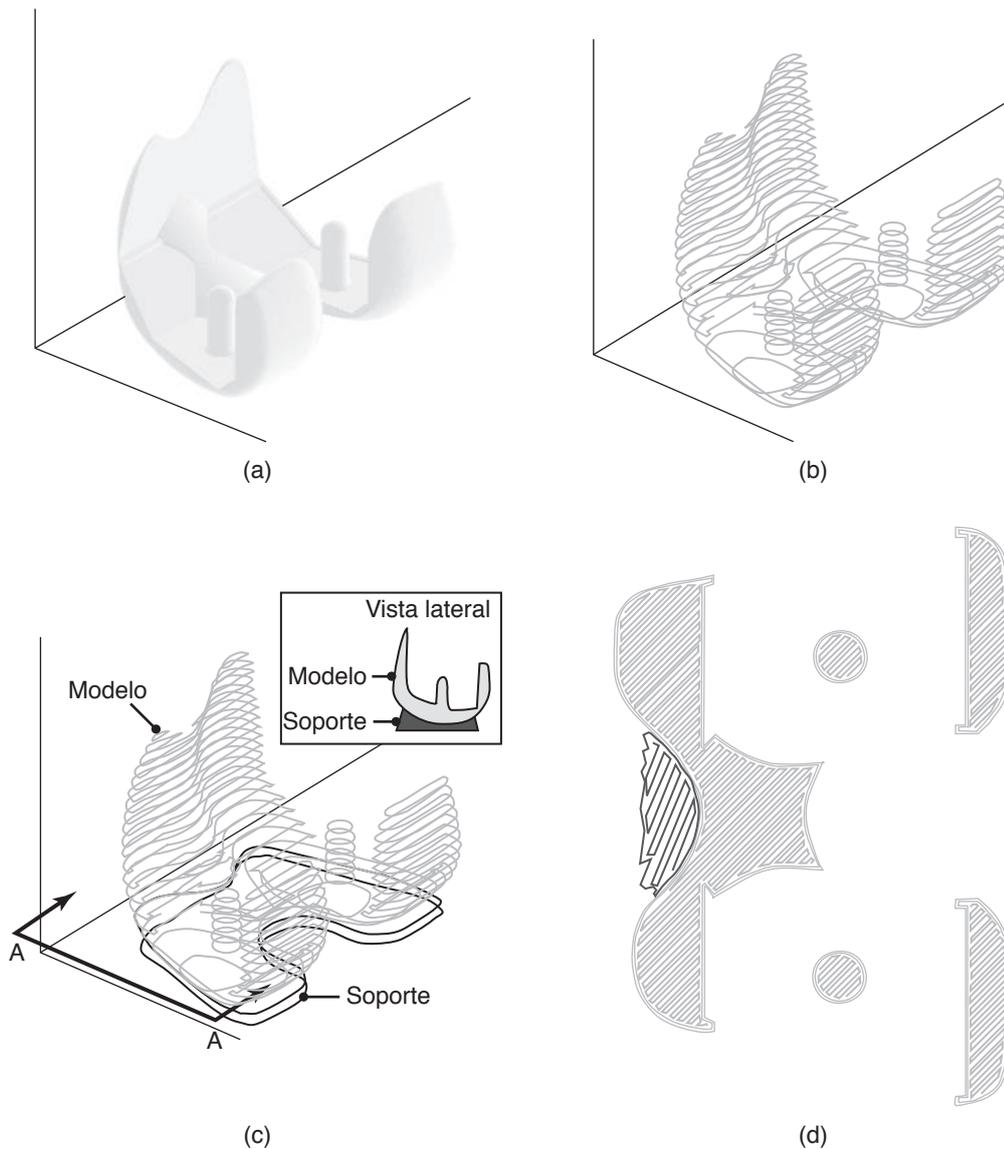
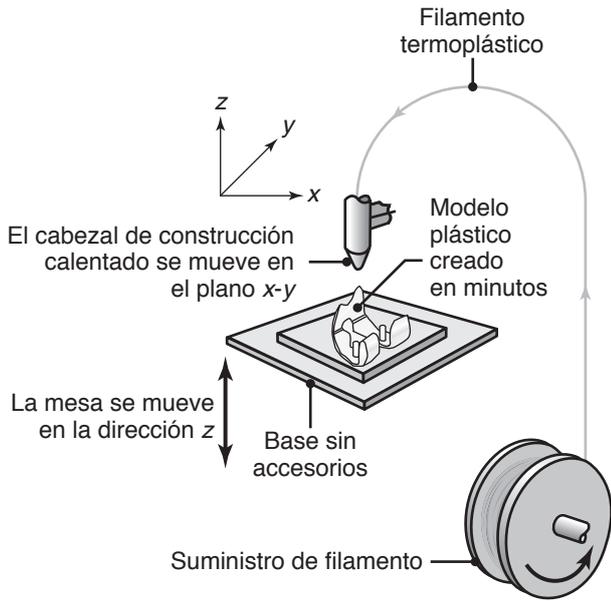


FIGURA 20.3 Pasos computacionales en la producción de un archivo de estereolitografía (STL, por sus términos en inglés), vea también la figura 38.5. (a) Descripción tridimensional de la pieza. (b) La pieza se divide en cortes: sólo se muestra 1 de 10. (c) Se planea el material de soporte a utilizar. (d) Se determina una serie de instrucciones para la herramienta con el fin de fabricar cada corte. La ruta del extrusor también se muestra en la sección A-A del inciso (c) para una operación de modelado por deposición fundida.

duce con una separación de filamentos menos densa en una capa, de manera que es más débil que el material del modelo y, por lo tanto, puede romperse con facilidad después que se haya completado la pieza.

En un modelo FDM, las capas se determinan con base en el diámetro del dado de extrusión, que normalmente oscila entre 0.05 y 0.12 mm (0.002 y 0.005 pulg). Este espesor representa la mejor tolerancia alcanzable en la dirección vertical. En el plano x - y , la precisión dimensional puede ser tan fina como 0.025 mm (0.001 pulg), siempre y cuando se pueda extruir un filamento en el componente. En el mercado está disponible toda una variedad de polímeros para diferentes aplicaciones. La *deposición de alambre metálico plano* utiliza un alambre de metal en lugar de un filamento de polímero, pero también requiere de un láser para calentar y unir el alambre depositado y construir las piezas.



(a)

(b)

FIGURA 20.4 (a) Ilustración esquemática del proceso de modelado por deposición fundida. (b) La FDM 900mc es una máquina de modelado por deposición fundida. Fuente: Cortesía de Stratasys, Inc.

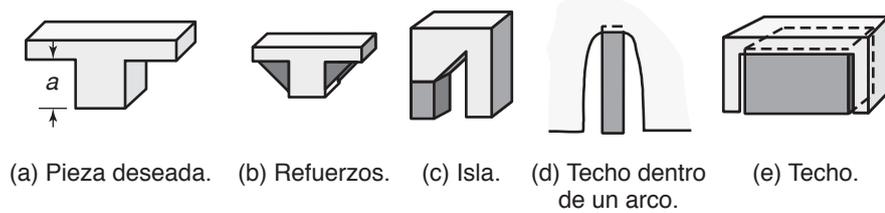


FIGURA 20.5 (a) Pieza con una sección saliente que requiere material de soporte. (b) a (e) Estructuras de soporte comúnmente utilizadas en las máquinas de prototipado rápido. Las zonas grises representan el material de soporte. Fuente: Reutilizada con autorización de la Society of Manufacturing Engineers.

Un examen detallado de una pieza producida por modelado de deposición fundida indicará que existe una superficie escalonada en los planos exteriores oblicuos. Si esta rugosidad superficial es objetable, es posible utilizar una herramienta calentada para suavizar la superficie, o ésta puede lijarse a mano o se le puede aplicar un revestimiento, a menudo en la forma de una cera de pulir. Sin embargo, en tal caso, las tolerancias totales pueden verse comprometidas a menos que las operaciones de acabado se realicen con sumo cuidado.

Aunque algunas máquinas de FDM comerciales pueden adquirirse por alrededor de \$20 000 dólares estadounidenses, otras pueden costar hasta \$300 000. Algunas máquinas autorreplicantes (sección 20.5) se basan en el FDM y pueden costar alrededor de \$1000. Las diferencias principales entre ellas son el tamaño máximo de las piezas que pueden producirse y la cantidad y los tipos de materiales que pueden utilizarse.

20.3.2 Estereolitografía

Un proceso común de prototipado rápido, que en realidad se desarrolló antes del FDM, es la *estereolitografía* (STL). Este proceso (figura 20.6) se basa en el principio del *curado*

(endurecimiento) de un fotopolímero líquido en una forma específica. Una tina, que contiene un mecanismo mediante el cual una plataforma se puede bajar y subir, se rellena con un polímero de acrilato líquido fotocurable. El líquido es una mezcla de monómeros acrílicos, oligómeros (polímeros intermedios) y un fotoiniciador (un compuesto que experimenta una reacción al absorber luz).

En la posición más alta de la plataforma (*a* en la figura 20.6), existe una capa delgada de líquido por encima de la plataforma. Un *láser*, que genera un haz de luz ultravioleta (UV), se enfoca sobre un área superficial seleccionada en el fotopolímero y luego se traslada en el plano *x-y*. El haz cura esa parte del fotopolímero (por ejemplo, una porción en forma de aro) y, así, produce una capa del cuerpo sólido. Enseguida, la plataforma se baja lo suficiente como para cubrir el polímero curado con otra capa de polímero líquido, y la secuencia se repite. El proceso se realiza en forma repetida hasta alcanzar el nivel *b* de la figura 20.6. Hasta ese momento, se ha generado una pieza cilíndrica con un espesor de pared constante. Observe que ahora la plataforma se ha bajado una distancia vertical *ab*.

En el nivel *b*, los movimientos en *x-y* del haz definen una geometría más amplia, por lo que se está produciendo una parte en forma de pestaña sobre el segmento previamente formado. Después de que se ha curado el espesor adecuado del líquido, el proceso se repite, produciendo otra sección cilíndrica entre los niveles *b* y *c*. Observe que el polímero líquido circundante todavía es fluido (porque no se ha expuesto al haz de rayos UV) y que la pieza se ha producido desde la parte inferior en “cortes” individuales. La porción no utilizada del polímero líquido puede usarse de nuevo para hacer otra pieza u otro prototipo.

Note que el término “estereolitografía”, tal como se utiliza para describir este proceso, proviene de que los movimientos son tridimensionales (de ahí la palabra estereo) y de que el proceso es similar a la litografía, en la que una imagen se imprime sobre una superficie plana receptiva a la tinta y las áreas en blanco son repelentes a la tinta. Observe también que, como en el FDM, la estereolitografía puede requerir un material de soporte más débil. En la estereolitografía, este soporte adopta la forma de estructuras perforadas.

Después de su terminación, la pieza se retira de la plataforma, se seca y limpia ultrasónicamente y con un baño de alcohol. Después se retira la estructura de soporte y la pieza se somete a un ciclo de curado final en una autoclave. La tolerancia más pequeña que puede lograrse en la estereolitografía depende de la exactitud del foco del láser; típicamente, es de unos 0.0125 mm (0.0005 pulg). También es posible producir superficies oblicuas con alta calidad.

Las piezas sólidas pueden realizarse mediante la aplicación de patrones especiales de escaneo láser para acelerar la producción. Por ejemplo, al espaciar las líneas de escaneo en la estereolitografía, es posible formar volúmenes o bolsas de polímero sin curar dentro de cascarones sólidos curados. Cuando la pieza se coloca después en un horno de posprocesamiento, las bolsas se curan y se forma una pieza sólida. De igual modo, las piezas que deben fundirse por revestimiento (sección 11.3.2) tendrán una estructura de panel drenable, lo cual permite que una fracción significativa de la pieza permanezca sin curar.

Los tiempos de ciclo totales de la estereolitografía se encuentran en el rango de unas pocas horas a un día, sin pasos de posprocesamiento como lijado y pintura. Dependiendo de su capacidad, el costo de las máquinas está entre \$100 000 y \$400 000. El costo del polímero líquido es del orden de \$300 por galón. El tamaño máximo de pieza que puede producirse es de 0.5 m × 0.5 m × 0.6 m (19 pulg × 19 pulg × 24 pulg).

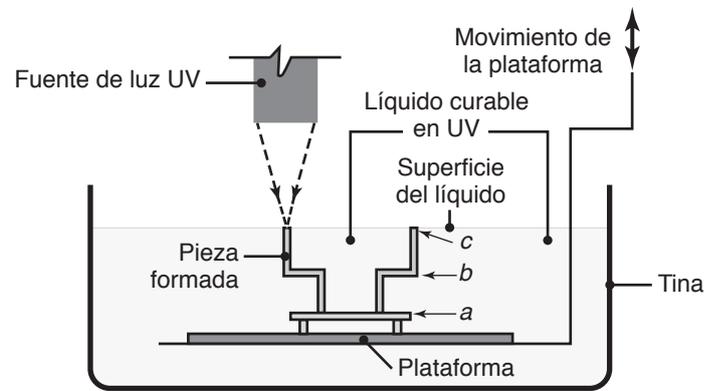


FIGURA 20.6 Ilustración esquemática del proceso de estereolitografía.



Código QR 20.3 Proceso de estereolitografía. (Fuente: Cortesía de 3D Systems).

La estereolitografía se ha usado con láseres altamente enfocados para producir piezas con componentes de tamaño micrométrico. El uso de la óptica requerida para producir tales componentes demanda capas más delgadas y velocidades de curado volumétrico inferiores. Cuando se utiliza la estereolitografía para fabricar sistemas micromecánicos, se le llama **microestereolitografía**.

20.3.3 Modelado MultiJet/PolyJet

El *modelado MultiJet* (MJM, por sus siglas en inglés) o *proceso PolyJet* es similar a la impresión por inyección de tinta, donde las cabezas de impresión depositan el fotopolímero en la bandeja de construcción. Lámparas ultravioleta, que se encuentran junto a los chorros, curan y endurecen instantáneamente cada capa, esto elimina la necesidad de cualquier curado después del modelado (que sí se requiere en la estereolitografía). El resultado es una superficie lisa de capas tan delgadas como $16\ \mu\text{m}$ (0.0006 pulg) que pueden manejarse inmediatamente después de completado el proceso.

Se utilizan dos materiales diferentes: uno para el modelo real y una segunda resina tipo gel para el soporte, como los que se muestran en la figura 20.5. Cada material se inyecta y cura simultáneamente, capa por capa. Cuando se ha completado el modelo, se retira el material de soporte usando una solución acuosa. Los tamaños construidos tienen un envoltorio de hasta $500\ \text{mm} \times 400\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ (20 pulg \times 16 pulg \times 8 pulg). El MJM tiene capacidades semejantes a las de la estereolitografía y utiliza resinas similares (tabla 20.2). Sus principales ventajas son su capacidad para evitar la limpieza de las piezas y las largas operaciones de curado posteriores al proceso, así como la producción de capas mucho más finas para obtener una mejor resolución.

CASO DE ESTUDIO 20.2 Diseño de una cafetera

Alessi Corporation es bien conocida por sus productos de cocina de alta calidad. A pesar de que fabrica sus productos con una amplia gama de materiales, es más famosa por sus diseños altamente pulidos de acero inoxidable. Un ejemplo es la cafetera Cupola, un producto favorito del mercado que iba a ser rediseñado de arriba a abajo, pero preservando las características generales del diseño establecido.

Los ingenieros de Alessi utilizaron modelado MultiJet para producir prototipos de los componentes de la cafetera, como los mostrados en la figura 20.7. Los prototipos permitieron que los ingenieros evaluaran la facilidad y seguridad del ensamble mecánico, pero se realizó un esfuerzo importante en el diseño del labio de las cafeteras con el fin de optimizar el vertido del café. Se construyó y evaluó una gran cantidad de prototipos de labio para obtener el diseño más robusto y más estéticamente agradable. La capacidad de comparar los prototipos físicos con el producto existente se considera fundamental para la evaluación de los nuevos diseños.

Después de seleccionar un diseño final a partir de los numerosos prototipos producidos, se encontró un ahorro de tiempo de entre cinco y seis semanas en el

desarrollo del producto. El ahorro de tiempo resultó en un ahorro en costos, así como en el aseguramiento del oportuno lanzamiento al mercado del producto rediseñado.



FIGURA 20.7 Prototipos de cafetera producidos mediante el modelado MultiJet y producto final (a la derecha). Fuente: Cortesía de Alessi Corporation y 3D Systems, Inc.

20.3.4 Sinterizado selectivo por láser

El *sinterizado selectivo por láser* (SLS, por sus siglas en inglés) es un proceso que se basa en el sinterizado (sección 17.4) de polvos no metálicos o, con menos frecuencia, de polvos metálicos en forma selectiva en un objeto individual. Los elementos básicos de este proceso se muestran en la figura 20.8. La parte inferior de la cámara de procesamiento está equipada con dos cilindros:

1. Un cilindro de alimentación de polvo que se eleva gradualmente para suministrar polvo al cilindro de construcción de la pieza mediante un mecanismo de rodillo.
2. Un cilindro de construcción de la pieza que se baja progresivamente a medida que la pieza se va formando.

Primero se deposita una capa fina de polvo en el cilindro de construcción de la pieza. Después, un rayo láser —guiado por una computadora de control del proceso que usa las instrucciones generadas por un programa CAD tridimensional de la pieza deseada— se enfoca sobre esa capa trazando y sinterizando una sección transversal particular en una masa sólida. En otras áreas el polvo sigue estando suelto, pero da soporte a la porción sinterizada. A continuación, se deposita otra capa de polvo; este ciclo se repite una y otra vez hasta que se produce toda la pieza tridimensional. Las partículas sueltas se sacuden y se recupera la pieza, la cual no requiere mayor tiempo de curado a menos que sea una cerámica, que debe cocerse para desarrollar resistencia.

En este proceso puede utilizarse una variedad de materiales, incluyendo polímeros (como ABS, PVC, nailon, poliéster, poliestireno y epoxy), cera, metales y materiales cerámicos, con los aglutinantes apropiados. Es más común el uso de polímeros debido a los láseres más pequeños, menos costosos y menos complejos que se requieren para el sinterizado. Con los cerámicos y metales, es una práctica común sinterizar sólo un aglutinante de polímero que ha sido mezclado con los polvos de cerámica o metal. Si se desea, la pieza puede sinterizarse de nuevo en un horno e infiltrarse con otro metal (vea también la sección 17.5).

20.3.5 Fusión por haz de electrones

Un proceso similar al sinterizado selectivo por láser y a la soldadura por haz de electrones (sección 30.6), la *fusión por haz de electrones*, o *haz E*, utiliza la fuente de energía asociada a un haz de electrones para derretir polvo de titanio o de cromo-cobalto para fabricar



Código QR 20.4 Proceso de sinterizado selectivo por láser (SLS). (Fuente: Cortesía de 3D Systems).



Código QR 20.5 Sinterizado selectivo por láser de metales. (Fuente: Production Systems Group, NIST).

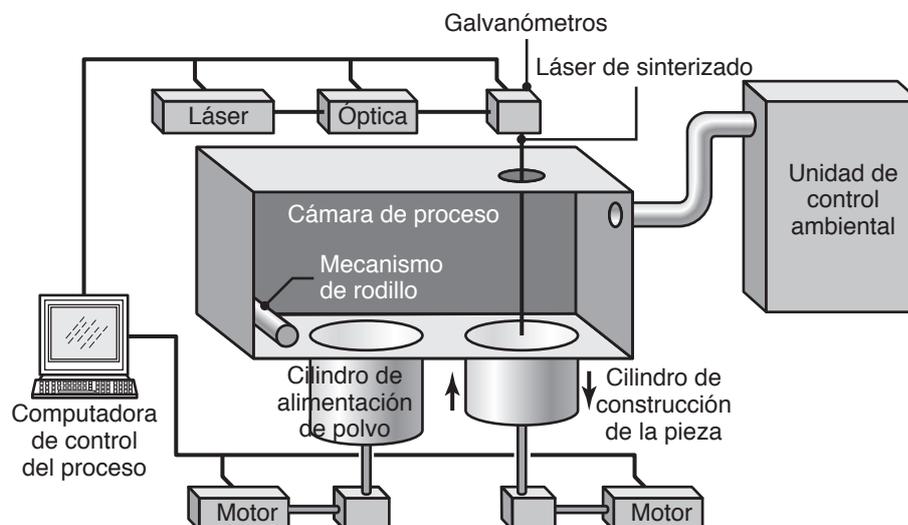


FIGURA 20.8 Ilustración esquemática del proceso de sinterizado selectivo por láser. Fuente: Según C. Deckard y P. F. McClure.

prototipos de metal. La pieza de trabajo se produce al vacío, por lo que el tamaño de la pieza construida está limitado aproximadamente a $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ (8 pulg \times 8 pulg \times 6.3 pulg). La fusión por haz de electrones (EBM, por sus siglas en inglés) es hasta 95% eficiente desde el punto de vista energético, comparada con una eficiencia de entre 10 y 20% para el sinterizado selectivo por láser, de manera que (más comúnmente) el polvo de titanio en realidad se funde y es posible producir piezas totalmente densas. Se puede obtener una tasa de acumulación de volumen de hasta $60\text{ cm}^3/\text{h}$ ($3.7\text{ pulg}^3/\text{h}$), con espesores de capa individuales de entre 0.050 y 0.200 mm (0.002 y 0.008 pulg). También se puede aplicar el prensado isostático en caliente (sección 17.3.2) sobre las piezas para mejorar su resistencia a la fatiga. Aunque en la actualidad se aplica principalmente al titanio y al cromo-cobalto, el proceso se está desarrollando para aceros inoxidables, aluminio y aleaciones de cobre.

20.3.6 Impresión tridimensional

En el proceso de *impresión tridimensional* (3DP), un cabezal de impresión deposita un material aglutinante inorgánico sobre una capa de polvo de polímero, cerámica o metal, como se muestra en la figura 20.9. Un pistón, que da soporte a la cama de polvo, se baja de forma gradual y, con cada paso, se deposita y fusiona una capa mediante el aglutinante.

En ocasiones, los procesos de modelado MultiJet y PolyJet (sección 20.3.3) son referidos como tecnologías de impresión en tres dimensiones, porque funcionan de manera similar a la inyección de tinta en las impresoras pero incorporando una tercera dirección (grosor). De hecho, el término impresión tridimensional ha sido utilizado de manera intercambiable con el prototipado rápido o la manufactura digital para incluir todas las operaciones de prototipado rápido; sin embargo, la 3DP se asocia más comúnmente con la impresión de un aglutinante sobre polvo.

La impresión tridimensional permite obtener una flexibilidad considerable en los materiales y aglutinantes utilizados. Los materiales en polvo comúnmente utilizados son mezclas de polímeros y fibras, arena de fundición y metales. Además, dado que es posible incorporar múltiples cabezales de impresión aglutinante en una máquina, se pueden producir prototipos a todo color si los aglutinantes tienen diferentes colores (vea el caso de estudio 20.3). El efecto es análogo, pero tridimensional, a la impresión de fotografías usando tres colores de tinta (rojo, cian y azul) en una impresora de inyección de tinta.

Una pieza común que se produce por impresión tridimensional a partir de polvo cerámico es un cascarón para la fundición en molde cerámico (vea la sección 11.2.4), en el que un polvo de óxido-aluminio o sílice-aluminio se funde con un aglutinante de sílice.



Código QR 20.6 Prototipado rápido a color con impresión tridimensional. (Fuente: Cortesía de 3D Systems).

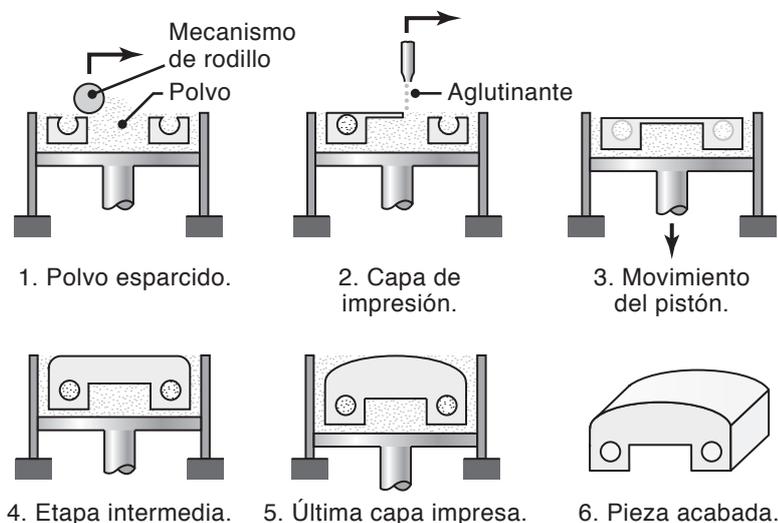


FIGURA 20.9 Ilustración esquemática del proceso de impresión tridimensional. Fuente: Según E. Sachs y M. Cima.

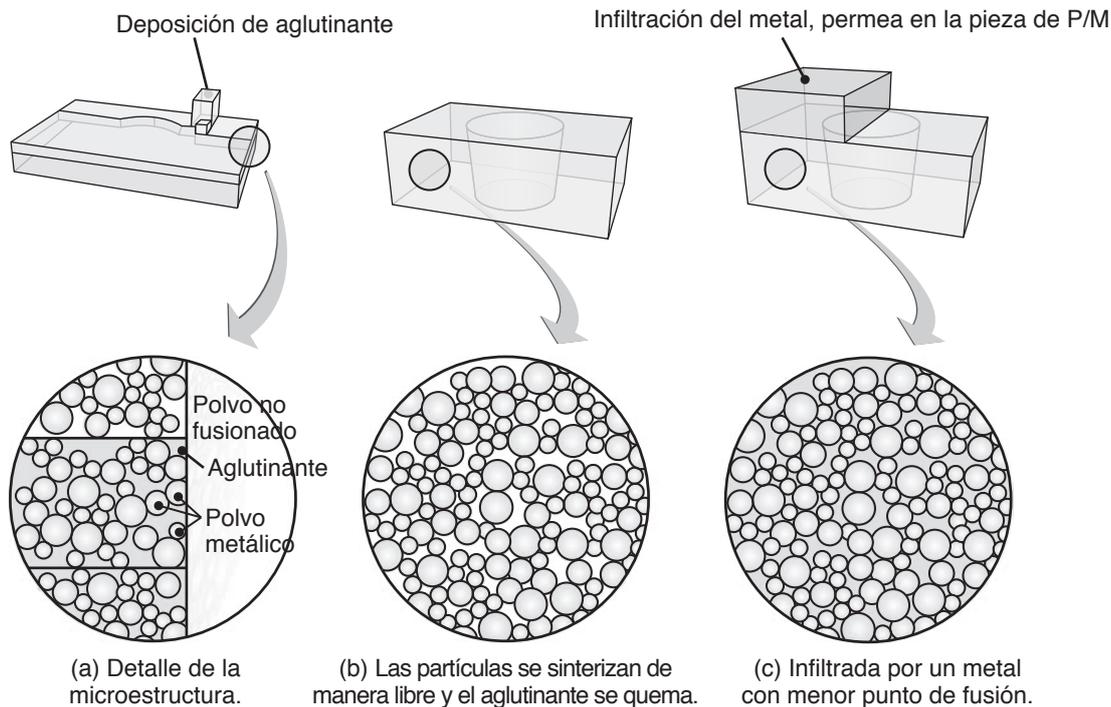


FIGURA 20.10 Impresión tridimensional usando (a) construcción de la pieza, (b) sinterizado y (c) medidas de infiltración para producir piezas metálicas. Fuente: Cortesía de The ExOne Company.

Los moldes se procesan posteriormente en dos pasos: (a) curado a alrededor de 150 °C (300 °F) y (b) cocción entre 1000 y 1500 °C (1840 y 2740 °F).

Las piezas producidas mediante el proceso de impresión tridimensional son algo porosas y, por lo tanto, pueden carecer de resistencia. La impresión tridimensional de polvos metálicos también puede combinarse con el sinterizado y la infiltración de metal (vea la sección 17.5) para producir piezas totalmente densas, utilizando la secuencia mostrada en la figura 20.10. Aquí, la pieza se produce como antes dirigiendo el aglutinante sobre los polvos. Sin embargo, la secuencia de construcción va seguida por el sinterizado para quemar el aglutinante y fusionar parcialmente los polvos metálicos, como en el moldeo por inyección de polvos descrito en la sección 17.3.3. Los metales comunes que se usan en la 3DP son aceros inoxidable, aluminio y titanio. Los materiales infiltrantes suelen ser cobre y bronce, que proporcionan buenas capacidades de transferencia de calor tanto como resistencia al desgaste. Este enfoque representa una estrategia eficaz para la creación rápida de herramientas (sección 20.6.1).

En un **proceso de manufactura de partículas balísticas** relacionado, se expulsa un chorro de material (como plástico, cerámica, metal o cera) a través de un pequeño orificio y se deposita sobre una superficie (objetivo) gracias a un mecanismo parecido al de inyección de tinta. Aquí no está involucrado un polvo, el material depositado se utiliza para construir el prototipo. El cabezal del chorro de tinta es guiado por un robot de tres ejes para producir prototipos tridimensionales.

CASO DE ESTUDIO 20.3 Producción de avatares de Second Life

Second Life y World of Warcraft son ejemplos de mundos virtuales a los que se accede a través de un sitio web. Para participar, los usuarios crean un “avatar”

que representa su áter ego en un mundo ficticio. Muchos juegos de computadora modernos (como Rock Band 2) también permiten a los usuarios producir

(continúa)



FIGURA 20.11 Versiones en prototipado rápido de personajes definidos por el usuario, o avatares, los cuales se producen a partir de descripciones geométricas en sitios web o juegos populares. (a) Avatar de Second Life, como se ve en una pantalla de computadora (izquierda) y después de la impresión (derecha), y (b) avatar conocido como “Wreker” de World of Warcraft. *Fuente:* (a) Cortesía de Z Corporation. (b) Cortesía de Figure Prints y Fablectory, Inc.

avatares muy detallados, con aspecto y personalidad singulares. Los avatares contienen datos geométricos tridimensionales que describen su apariencia, la cual puede ser traducida a un formato de archivo adecuado para el prototipado rápido.

Los avatares pueden imprimirse a todo color, como una estatuilla de 150 mm (6 pulg) de altura, usando las

impresoras tridimensionales Z-Corp Spectrum Z510 o ZPrinter 450 (figura 20.11). Los usuarios pueden ordenar los prototipos de sus avatares por internet, mismos que se imprimen y envían al usuario en cuestión de días.

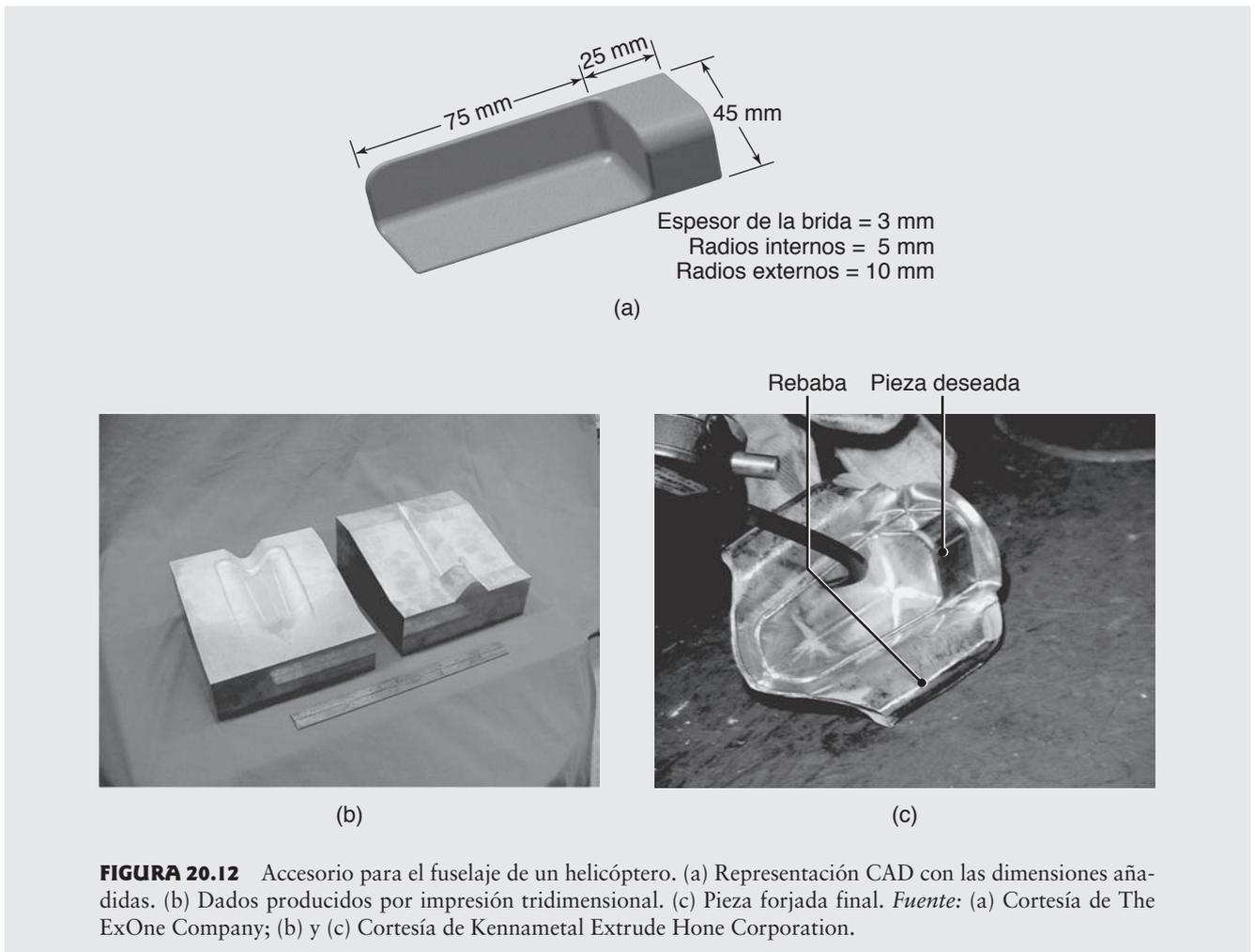
CASO DE ESTUDIO 20.4 Accesorios para el fuselaje de helicópteros

Sikorsky Aircraft Company necesitaba producir mediante forjado un número limitado de los accesorios para fuselaje que se muestran en la figura 20.12a. Sikorsky quería producir los dados de forjado por medio de tecnologías de impresión tridimensional. Se diseñó un dado usando la descripción de la pieza en CAD. Se incorporaron las tolerancias y rebabas del forjado mediante el diseño del dado.

Los dados se produjeron usando una impresora tridimensional ProMetal, como se muestra en la figura 20.12b. El prototipo se realizó en capas de 0.178 mm (0.007 pulg) con polvo de acero inoxidable como el medio para la pieza de trabajo. El tiempo total empleado en la máquina 3DP fue un poco menor a 45 horas. Esto fue seguido por el curado del aglutinante (10 horas, más

5 horas de enfriamiento), el sinterizado (40 horas, más 17 horas de enfriamiento) y la infiltración (27 horas, más 15 horas de enfriamiento). Enseguida, los dados estuvieron terminados y se colocaron en un soporte, entonces la pieza se forjó en una prensa hidráulica de 800 toneladas a una temperatura aproximada del dado de 300 °C. La figura 20.12c muestra una pieza tal como sale del forjado, todavía requiere el troquelado de rebabas antes de que pueda utilizarse. Los dados se produjeron en poco más de seis días, en comparación con los varios meses requeridos para la producción de un dado convencional (sección 14.7).

Fuente: Cortesía de The ExOne Company.



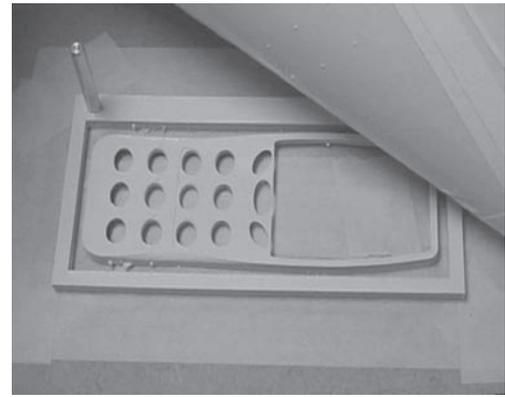
20.3.7 Manufactura de objetos laminados

La laminación consiste en la superposición de capas unidas adhesivamente entre sí. Existen diversas variaciones de la *manufactura de objetos laminados* (LOM, por sus siglas en inglés). Las versiones más simples y menos costosas involucran el uso de software de control y cortadoras de vinilo para producir el prototipo. Las cortadoras de vinilo son máquinas simples de control numérico por computadora que cortan formas a partir de vinilo o de hojas de papel. Cada hoja tiene una serie de orificios de registro que permiten la alineación y colocación adecuadas sobre una base de construcción. La figura 20.13 ilustra la fabricación de un prototipo por LOM con ensamble manual. Los sistemas de manufactura de objetos laminados son muy económicos y populares en escuelas y universidades porque ofrecen una demostración práctica de manufactura aditiva y producción de piezas por capas.

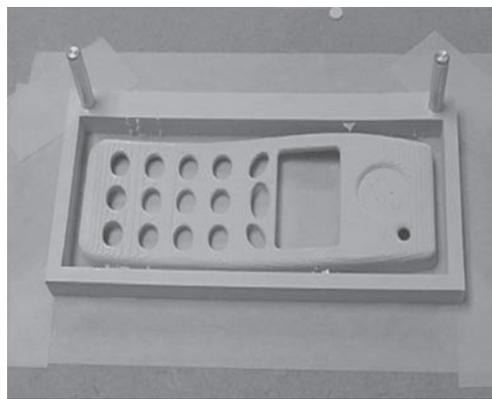
En casos donde sistemas más avanzados utilizan capas de papel o plástico, los sistemas LOM también pueden ser elaborados con un pegamento activado por calor en uno de los lados para producir las piezas. Las formas son quemadas en la hoja con un láser (en realidad es una acción de corte de alta precisión) y las piezas se construyen capa por capa (figura 20.14). En algunos sistemas, el exceso de material debe retirarse manualmente una vez que se ha completado la pieza. La eliminación se simplifica mediante la programación del láser para quemar perforaciones con patrones entrecruzados. Las líneas de cuadrícula resultantes hacen que la pieza luzca como si hubiera sido construida a partir de papel cuadrículado, con cuadros impresos sobre su superficie, de manera similar al papel gráfico.



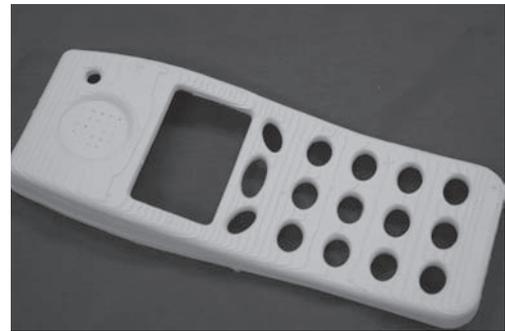
(a)



(b)

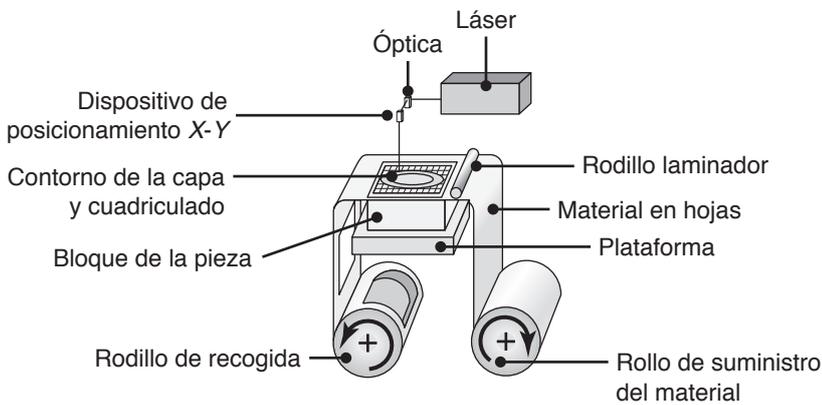


(c)

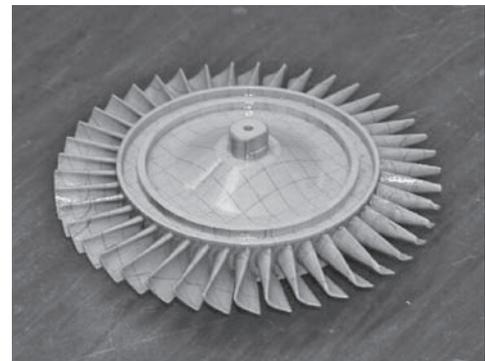


(d)

FIGURA 20.13 Producción de un prototipo mediante manufactura de objetos laminados. (a) Las capas se obtienen a partir de una cortadora de vinilo; (b) las capas se apilan manualmente para formar la pieza; (c) ensamble laminado terminado; (d) prototipo final de la pieza. Fuente: Cortesía de P. Barraclough, Boxford Ltd.



(a)



(b)

FIGURA 20.14 (a) Ilustración esquemática del proceso de manufactura de objetos laminados. (b) Prototipo de un disco de turbina hecho por LOM. Fuente: Cortesía de M. Feygin, Cubic Technologies, Inc.

20.3.8 Formado neto por ingeniería láser

Los desarrollos más recientes en los procesos de manufactura aditivos involucran el principio de usar un rayo láser para fundir y depositar polvo de metal o alambre, de nuevo capa por capa, sobre una capa previamente fundida. Los patrones de las capas depositadas están controlados por un archivo CAD. Este proceso de formado casi neto se denomina *formado neto por ingeniería láser* (LENS, un nombre comercial) y se basa en las tecnologías de soldadura y revestimiento por rayo láser (secciones 30.7 y 34.3). La entrada de calor y el enfriamiento se controlan en forma precisa para desarrollar una microestructura favorable.

El proceso de deposición se lleva a cabo dentro de un área cerrada y en un ambiente de argón para evitar los efectos adversos de la oxidación, en particular sobre el aluminio. En la fabricación directa de piezas, este proceso resulta adecuado para una amplia variedad de metales y aleaciones especiales, incluyendo herramientas y moldes totalmente densos. También se puede utilizar para la reparación de componentes delgados y delicados. Existen otros métodos de procesamiento similares que utilizan láseres e incluyen la *construcción de metal controlado* (CMB, por sus siglas en inglés) y la *deposición de metal a precisión* (PMD, por sus siglas en inglés).

20.3.9 Curado de suelo sólido

El proceso de *curado de suelo sólido* (SGC, por sus siglas en inglés) es único porque los cortes enteros de una pieza se fabrican a un tiempo y, como resultado, se logra un gran rendimiento en comparación con el de otros procesos de prototipado rápido. Sin embargo, el curado de suelo sólido está entre los procesos más caros, por lo que su adopción ha sido mucho menos común que la de otros tipos de prototipado rápido y no existen máquinas nuevas disponibles. Básicamente, el método consta de los siguientes pasos:

1. Primero se crea un corte mediante software de computadora, enseguida se imprime una máscara del corte en una hoja de vidrio por un proceso de impresión electrostática similar al utilizado en las impresoras láser. Se requiere una máscara porque el área del corte (donde se desea el material sólido) sigue siendo transparente.
2. Mientras se está preparando la máscara, se deposita una capa delgada de polímero fotorreactivo sobre la superficie de trabajo y se distribuye uniformemente.
3. La fotomáscara se coloca sobre la superficie de trabajo y se proyecta un reflector de rayos ultravioleta (UV) a través de la máscara. En cualquier área donde la máscara sea transparente, la luz brillará para curar el polímero provocando así el endurecimiento del corte deseado.
4. La resina no afectada, todavía líquida, se aspira fuera de la superficie.
5. Posteriormente, se extiende cera líquida soluble en agua por toda la zona de trabajo, llenando las cavidades que previamente ocupaba el polímero líquido no expuesto. Dado que la pieza de trabajo está sobre una placa de enfriamiento y se mantiene fría, la cera se endurece rápidamente.
6. Enseguida, la capa se fresa (sección 24.2) para conseguir el espesor apropiado y la lisura correcta.
7. Este proceso se repite, capa por capa, hasta completar la pieza.

El curado de suelo sólido tiene la ventaja de permitir altas tasas de producción porque se producen cortes enteros a un tiempo y se usan dos pantallas de cristal en forma simultánea; es decir, mientras se utiliza una máscara para exponer el polímero, la siguiente máscara ya se está preparando y queda lista tan pronto como se haya completado la operación de fresado.

20.4 Prototipado virtual

El *prototipado virtual* es una forma de prototipado basada puramente en software; utiliza gráficos avanzados y entornos de realidad virtual para permitir que los diseñadores examinen una pieza. Esta tecnología es utilizada por paquetes CAD comunes y convencionales para dibujar una pieza y que el diseñador pueda observarla y evaluarla. Sin embargo, la clasificación de prototipado virtual suele restringirse a los sistemas de representación más avanzados.

Las formas más simples de estos sistemas utilizan un software complejo y rutinas gráficas tridimensionales para permitir a los usuarios cambiar su perspectiva de las piezas en una pantalla de computadora. Las versiones más complejas utilizan cascos y guantes de realidad virtual con sensores adecuados para que el usuario observe un prototipo generado por computadora de la pieza deseada en un entorno completamente virtual.

El prototipado virtual ofrece una representación instantánea de las piezas para su evaluación, pero los sistemas más avanzados son costosos. Debido a que la familiaridad con las interfaces de software es un requisito previo a su aplicación, estos sistemas tienen curvas de aprendizaje muy empinadas. Por otra parte, muchos practicantes de la manufactura y el diseño prefieren evaluar un prototipo físico en vez de su representación en una pantalla de video. A menudo, perciben que los prototipos de realidad virtual son inferiores a los prototipos mecánicos, aunque los diseñadores depuran tantos errores o más en el entorno virtual.

Se tienen algunos ejemplos importantes de productos complejos fabricados sin prototipos físicos (**diseño sin papel**). Tal vez el ejemplo más conocido es el avión Boeing 777, para el cual se evaluaron ajustes mecánicos e interferencias en un sistema CAD y las dificultades se corrigieron antes de que se fabricara el primer modelo de producción (vea la sección 38.5).

20.5 Máquinas autorreplicantes

Con la expiración de la protección de patentes para muchos de los procesos de prototipado rápido, ahora se ha desarrollado un movimiento basado en el intercambio de código abierto de software y diseños de máquinas. Aprovechando las herramientas de intercambio de datos que hay en internet, se han desarrollado máquinas de bajo costo basadas en el modelado por deposición fundida, las cuales están disponibles como equipos totalmente construidos o sólo como planos de construcción disponibles para su descarga.

La ampliación de las tradiciones de software de *código abierto* para el hardware ha alentado el desarrollo de **máquinas autorreplicantes**, donde la máquina de prototipado rápido crea piezas que se utilizan para producir otra máquina de prototipado rápido idéntica. No todas las piezas se replican (por ejemplo, las piezas de hardware de control y las piezas metálicas estructurales son elementos separados), pero es posible producir hasta el 60% de los componentes.

Lo anterior ha conducido a una proliferación de máquinas de prototipado rápido a bajo costo. Por ejemplo, la RepRaps puede construirse a partir de componentes que cuestan unos pocos cientos de dólares sin ensamblar, el equipo Thing-o-Matic cuesta alrededor de \$1000 y un Cube completo cuesta unos \$1300 (vea la figura 20.15).

Los materiales disponibles para este tipo de máquinas son limitados y los espacios de construcción son más pequeños y las resoluciones más gruesas que las de equipos comerciales más establecidos. Sin embargo, con el software de código abierto, el campo se está desarrollando rápidamente. Además de los continuos desarrollos de hardware, también se han establecido varias bibliotecas de diseño basadas en internet



Código QR 20.7 Características de un Cube. (Fuente: Cortesía de 3D Systems).

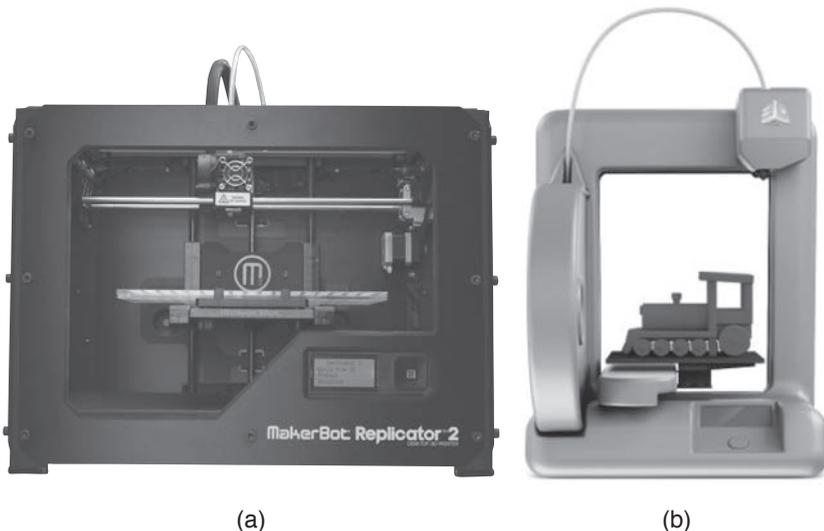


FIGURA 20.15 Ejemplos de sistemas de prototipado rápido de bajo costo basados en el modelado por deposición fundida. (a) Impresora Replicator[®] 2 Desktop 3D de MakerBot[®] basada en el modelado por deposición fundida y en software de código abierto, tiene un volumen de construcción de hasta 110 mm × 110 mm × 120 mm usando los polímeros ABS o PLA (ácido poliláctico), y (b) el Cube, con un espacio de construcción de hasta 140 mm × 140 mm × 140 mm. Fuente: (a) Cortesía de MakerBot, Inc., (b) Cortesía de 3D Systems.

con el fin de compartir piezas. El intercambio de archivos también se hace a través de internet y es posible realizar diseños en colaboración. Esta corriente, llamada movimiento creador (**maker movement**), permite la fabricación rápida y barata de prototipos.

20.6 Manufactura directa y creación rápida de herramientas

Aunque son muy beneficiosos como herramientas de demostración y visualización, los procesos de prototipado rápido también se han utilizado como un paso de manufactura en la producción real. Se utilizan dos métodos básicos:

1. Producción directa de componentes o piezas de ingeniería hechos con metales, cerámicos y polímeros mediante prototipado rápido.
2. Producción de herramientas o modelos por prototipado rápido para su uso en diversas operaciones de manufactura.

Las piezas de polímeros, obtenidas a partir de diversas operaciones de prototipado rápido, no sólo son útiles para la evaluación del diseño y la solución de problemas, de vez en cuando estos procesos también se pueden usar directamente para la fabricación de piezas, a lo cual se denomina *manufactura directa*. En ese caso, el componente se genera de manera directa, hasta una forma casi neta, a partir de un archivo de computadora que contiene la geometría de la pieza. Las principales limitaciones para el uso generalizado del prototipado rápido en la manufactura directa, o *manufactura rápida*, son:

- Los costos de materia prima son altos y el tiempo requerido para producir cada pieza es demasiado largo como para ser viable en grandes series de producción; sin embargo, hay muchas aplicaciones donde las series de producción son lo suficientemente pequeñas como para justificar la manufactura directa.
- El desempeño a largo plazo y consistente de las piezas fabricadas rápidamente (en comparación con los métodos de manufactura más tradicionales) puedan ser sospechosos; especialmente en relación con la fatiga, el desgaste y el ciclo de vida de las piezas fabricadas.

Con el fin de que la manufactura rápida sea una opción más competitiva y viable en el sector manufacturero, se están haciendo grandes progresos para abordar estas preocupaciones. El futuro de estos procesos, aunque prometedor, sigue siendo un reto, especialmente en vista de que la manufactura rápida ya está siendo considerada como un método de producción para artículos sobre pedido. De este modo, los clientes podrán solicitar una pieza en particular que se producirá dentro de un tiempo de espera relativamente corto.



Código QR 20.8 Manufactura directa: brazos mágicos impresos en 3D. (Fuente: Cortesía de Stratasys, Inc.)

CASO DE ESTUDIO 20.5 Alineadores ortodóncicos Invisalign®

Aparatos de ortodoncia para enderezar dientes han existido por más de 50 años. Estas piezas implican soportes de metal, cerámica o plástico, los cuales se unen adhesivamente a los dientes con accesorios para su conexión a un cable; posteriormente, el aparato se fuerza hasta determinada forma sobre los dientes para enderezarlos de la manera deseada en unos pocos años. Los aparatos ortodóncicos convencionales son una técnica bien conocida y exitosa para asegurar la salud dental a largo plazo. Sin embargo, los aparatos convencionales tienen varios inconvenientes, incluyendo que (a) son estéticamente poco atractivos; (b) los cables y soportes

cortantes pueden ser dolorosos; (c) atrapan comida, lo que conduce a la descomposición prematura de dientes; (d) el cepillado de los dientes y el uso de hilo dental son más difíciles y menos eficaces con la presencia de los soportes, y (e) deben evitarse ciertos alimentos que pueden dañar los aparatos ortodóncicos.

Una solución para esos inconvenientes es el sistema Invisalign realizado por Align Technology, Inc. Consiste en una serie de alineadores, cada uno de los cuales utiliza la persona durante aproximadamente dos semanas. Cada alineador (figura 20.16) consiste en una geometría precisa que mueve gradualmente los dientes

(continúa)



FIGURA 20.16 (a) Alineador para uso ortodóncico fabricado mediante una combinación de creación rápida de herramientas y termoformado. (b) Comparación de los aparatos ortodóncicos convencionales con los alineadores transparentes. *Fuente:* Cortesía de Align Technology, Inc.

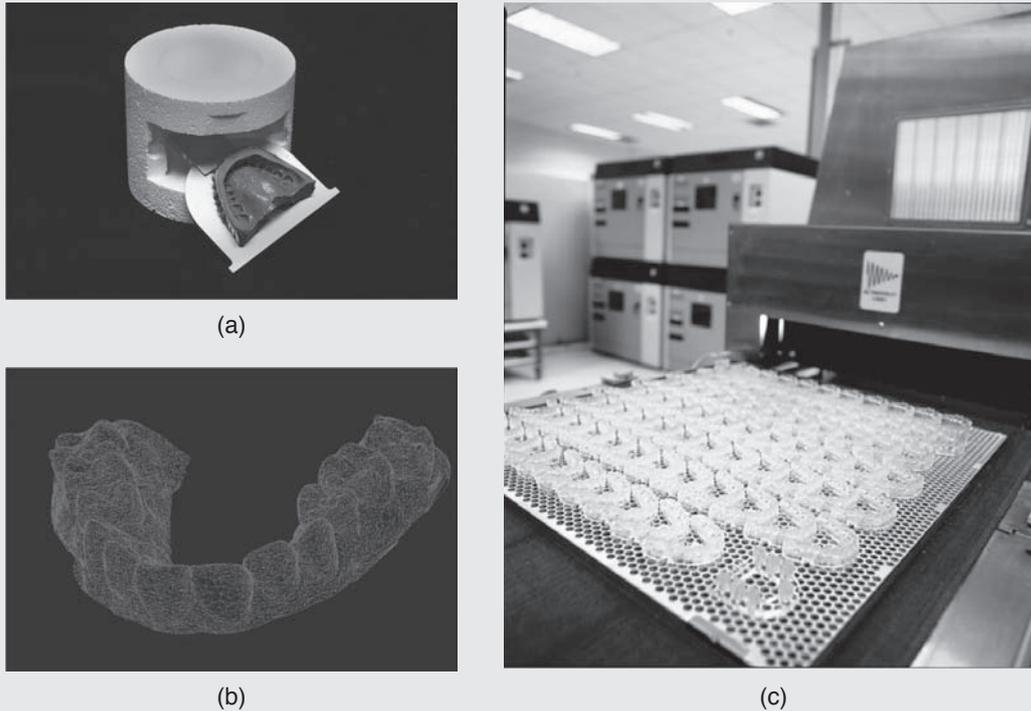


FIGURA 20.17 Secuencia de manufactura para los alineadores ortodóncicos Invisalign. (a) Creación de una impresión en polímero de los dientes del paciente. (b) Modelado computacional para producir representaciones CAD de los perfiles de dientes deseados. (c) Producción de los modelos incrementales para el movimiento dental deseado; un alineador se produce mediante el termoformado de una hoja de plástico transparente contra este modelo. *Fuente:* Cortesía de Align Technology, Inc.

hasta la posición deseada. Debido a que los alineadores se pueden quitar para comer, cepillarse los dientes y usar hilo dental, se elimina la mayoría de los inconvenientes que presentan los aparatos convencionales. Además, como se producen a partir de un plástico transparente, los alineadores no afectan seriamente la apariencia de los dientes de la persona.

El producto de Invisalign utiliza una combinación de tecnologías avanzadas en el proceso de producción que se muestra en la figura 20.17. El tratamiento comienza con un ortodoncista o dentista general que hace una impresión en polímero de los dientes del paciente (figura 20.17a). Enseguida, estas impresiones se utilizan para crear una representación CAD tridimensional de los dientes del paciente (figura 20.17b). Posteriormente, un software CAD patentado colabora en el desarrollo de una estrategia de tratamiento para mover los dientes de una manera óptima.

Una vez que el ortodoncista aprueba el plan de tratamiento y éste se desarrolla, la información basada en computadora se utiliza para producir los alineadores. Esto se hace a través de una nueva aplicación de la este-

reolitografía. Aunque existen varios materiales disponibles para la estereolitografía, tienen una característica de sombreado color amarillo-marrón, por lo tanto no son adecuados para la aplicación directa como un producto de ortodoncia. En lugar de ello, el proceso de Align utiliza una máquina de estereolitografía que produce patrones de las posiciones incrementales deseadas en los dientes (figura 20.17c). A continuación, se termoforma una lámina de polímero transparente (sección 19.6) sobre estos modelos para producir los alineadores, que luego se envían al ortodoncista. Con la supervisión del médico, los pacientes son instruidos para cambiar a la siguiente serie de alineadores cada dos semanas.

El producto Invisalign ha demostrado ser popular entre los pacientes que desean promover la salud dental y para preservar sus dientes a lo largo de su vida. El uso de la estereolitografía para producir herramientas precisas en forma rápida y económica permite que este tratamiento ortodóncico sea una opción económicamente viable.

Fuente: Usado con autorización de Align Technology, Inc.

20.6.1 Creación rápida de herramientas

Se han ideado varios métodos para la producción rápida de herramientas por medio de procesos de prototipado rápido. Las ventajas de la creación rápida de herramientas incluyen:

1. Contrarrestar el alto costo de la mano de obra y la escasez de modelistas expertos.
2. Una reducción importante del tiempo de entrega.
3. Adoptar con facilidad diseños huecos, por lo que es posible producir piezas fundidas ligeras con mayor facilidad.
4. El uso integral de tecnologías CAD permite el uso de dados modulares, con herramientas a base de moldes (placas acoplables) e insertos especialmente fabricados; esta técnica puede reducir aún más los costos de los herramientas.
5. La colocación de los canales de enfriamiento en los moldes puede optimizarse más fácilmente, dando lugar a una reducción de los tiempos de ciclo.
6. La contracción debida a la solidificación o contracción térmica puede compensarse automáticamente con el software para producir herramientas del tamaño adecuado y, a su vez, para producir las piezas deseadas.

La principal desventaja de la creación rápida de herramientas es la vida potencialmente reducida de la herramienta o del modelo, en comparación con la obtenida a partir del maquinado de materiales para herramientas y dados, como el acero para herramientas o carburos de tungsteno (capítulo 21).

El método más simple para aplicar las operaciones de prototipado rápido a otros procesos de manufactura consiste en la producción directa de modelos o moldes. Como un ejemplo, la figura 20.18 muestra un enfoque para la fundición por revestimiento. Aquí, los modelos individuales se realizan en una operación de prototipado rápido (en este caso la estereolitografía) y luego se utilizan como modelos en el ensamble de un árbol para la fundición por revestimiento (figura 11.14). Tenga en cuenta que este enfoque requiere un polímero que se derrita y queme por completo en el molde de cerámica; tales polímeros están disponibles para todos los tipos de operaciones del prototipado rápido de polímeros. Las piezas, tal como se dibujan en los programas CAD, suelen modificarse en el

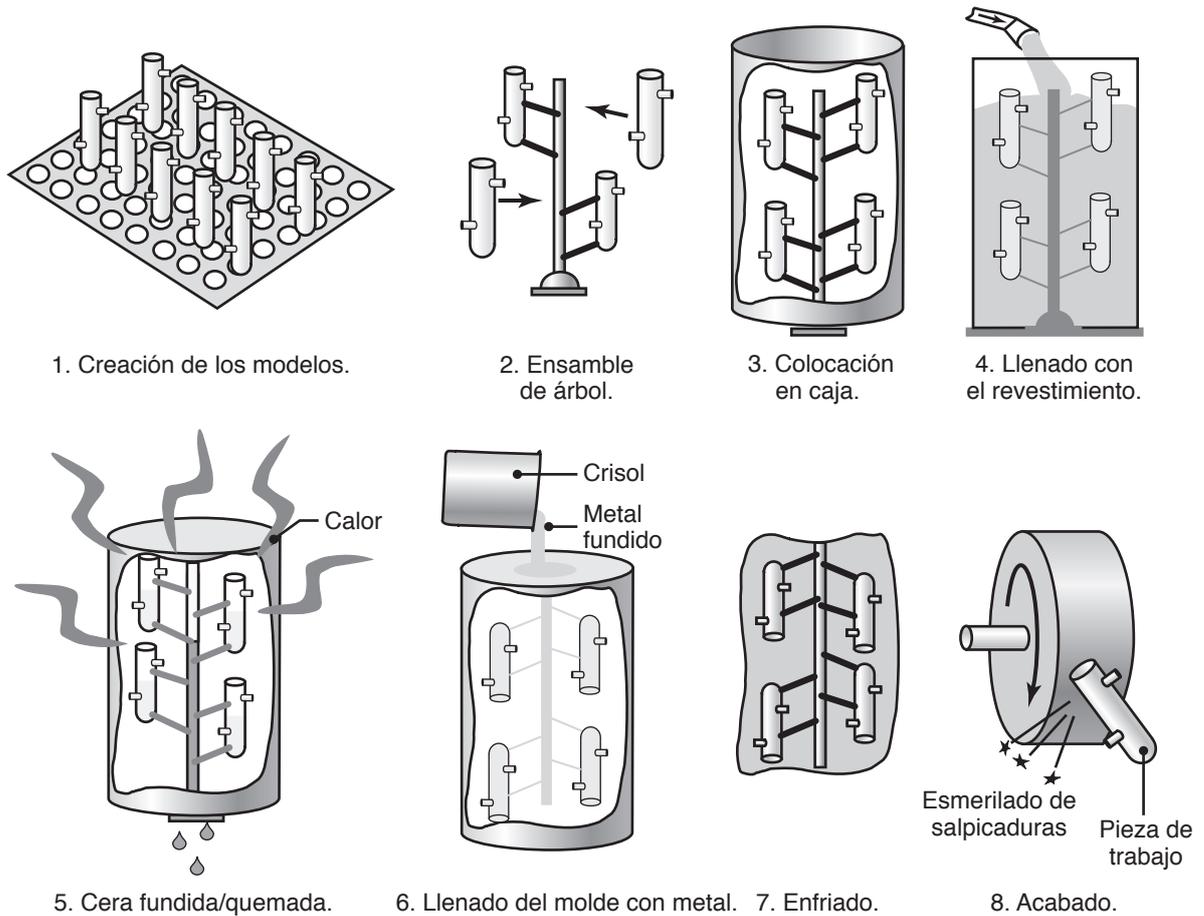


FIGURA 20.18 Pasos de manufactura para la fundición por revestimiento con piezas de cera de prototipado rápido como piezas en bruto; este método utiliza una caja de moldeo para el revestimiento, pero también se puede utilizar un método de cascarón. Fuente: Cortesía de 3D Systems, Inc.

software para considerar la contracción y es la parte modificada la que se produce en la maquinaria de prototipado rápido.

Como otro ejemplo, la impresión tridimensional puede producir fácilmente una carcasa de fundición de molde cerámico (sección 11.2.2) o molde de arena (sección 11.2.1), donde un polvo de óxido-aluminio o sílice-aluminio se fusione con un aglutinante de sílice. Los moldes deben procesarse posteriormente en dos etapas: curado a alrededor de 150 °C (300 °F) y después cocción entre 1000 y 1500 °C (1840 y 2740 °F).

Otra aplicación común de la creación rápida de herramientas es el moldeo por inyección de polímeros (sección 19.3) donde el molde o, más típicamente, un *inserto de molde* se fabrica por prototipado rápido. Los moldes para el vaciado de cerámicos en barbotina (sección 18.2.1) también pueden producirse de esta manera. Para producir moldes individuales, los procesos de prototipado rápido se utilizan directamente y los moldes se conforman con la permeabilidad deseada. Por ejemplo, en el modelado por deposición fundida, este requisito demanda que los filamentos se coloquen sobre los cortes individuales, con un pequeño espacio entre los filamentos adyacentes. Después, los filamentos se posicionan formando ángulos rectos en las capas adyacentes.

La ventaja de la creación rápida de herramientas es la capacidad de producir un molde o un inserto de molde que puede utilizarse en la fabricación de componentes sin el retraso de tiempo (típicamente varios meses) que tradicionalmente se requiere para la adquisición de herramientas. Por otra parte, el diseño se simplifica debido a que el diseñador sólo necesita analizar un archivo CAD de la pieza deseada; después, el software produce la geometría de la herramienta y automáticamente compensa la contracción.

Además de la aplicación directa de la tecnología de prototipado rápido a la producción de herramientas o modelos, se han desarrollado otros enfoques de la creación rápida de herramientas basados en las tecnologías de prototipado rápido.

El **moldeo/fundición de uretano por vulcanización a temperatura ambiente (RTV)**, por sus siglas en inglés se puede realizar mediante la preparación de un modelo de una pieza mediante cualquier operación de prototipado rápido. El modelo se recubre con un agente de separación y puede ser modificado o no para definir las líneas de partición del molde. Se vierte hule líquido RTV sobre el modelo y se cura (normalmente en unas cuantas horas) para producir las mitades del molde. Después, el molde se utiliza con uretanos líquidos en las operaciones de moldeo por inyección o moldeo por inyección reacción (sección 19.3). Una limitación importante de este enfoque es una vida inferior del molde ya que el poliuretano presente se somete a un daño progresivo y el molde puede ser adecuado para la fabricación de apenas 25 piezas.

También pueden producirse *moldes de epoxy* y *epoxy relleno de aluminio*, pero en ese caso el diseño del molde requiere un cuidado especial. Con el RTV, la flexibilidad del molde permite que los moldes se despeguen de la pieza curada. Con los moldes de epoxy, la alta rigidez se opone a este método de extracción de las piezas y el diseño del molde es más complicado. Así, por ejemplo, se necesitan ángulos de salida y deben evitarse los rebajos y otras características de diseño que sí pueden producirse por el moldeo/fundición de uretano por vulcanización a temperatura ambiente.

El **moldeo por inyección de acetil epoxy transparente sólido (ACES)**, por sus siglas en inglés, también conocido como *AIM directo*, se refiere a la utilización del prototipado rápido, por lo general estereolitografía, para producir directamente moldes adecuados para el moldeo por inyección. Los moldes son carcasas con un extremo abierto para permitir el llenado con un material como epoxy, epoxy con relleno de aluminio o un metal con bajo punto de fusión. Dependiendo del polímero usado en el moldeo por inyección, la vida del molde puede ser tan corta como la manufactura de 10 piezas, aunque en ocasiones es posible fabricar 100 piezas por molde.

Herramientales de metal rociado. En este proceso, mostrado en la figura 20.19, se crea un modelo mediante prototipado rápido. Después, una operación de rociado de metal (sección 34.5) cubre la superficie del modelo con una aleación de zinc y aluminio. El recubrimiento de metal se coloca en una caja y se encapsula con un material de epoxy o epoxy con relleno de aluminio. En algunas aplicaciones, se pueden incorporar líneas de enfriamiento en el molde antes de aplicar el epoxy. Se retira el modelo y dos de esas mitades de molde se utilizan como en las operaciones de moldeo por inyección. La vida del molde depende en gran medida del material usado y de las temperaturas involucradas, puede variar desde unas cuantas hasta miles de piezas.

Proceso Keltool. En el *proceso Keltool* se produce un molde de hule RTV sobre la base de un modelo de prototipado rápido, como se describió anteriormente. A continuación, el molde se llena con una mezcla de polvo de acero para herramienta A6 (sección 5.7), carburo de tungsteno y aglutinante de polímero y se deja curar. La herramienta así llamada cruda o en *verde* (como en los cerámicos y en la metalurgia de polvos) se cuece para quemar el polímero tanto como para fundir el acero y los polvos de carburo de tungsteno. Enseguida, la herramienta se infiltra con cobre en un horno para producir el molde final. Posteriormente, el molde puede maquinarse o pulirse para impartirle un acabado superficial superior y buenas tolerancias dimensionales. Los moldes de Keltool están limitados en tamaño a alrededor de 150 mm × 150 mm × 150 mm (6 pulg × 6 pulg × 6 pulg); es posible fabricar e instalar un inserto de molde, lo cual es apto para operaciones de moldeo de gran volumen. Dependiendo de las condiciones del material y del procesamiento, la vida del molde puede variar desde 100 000 hasta 10 millones de piezas.

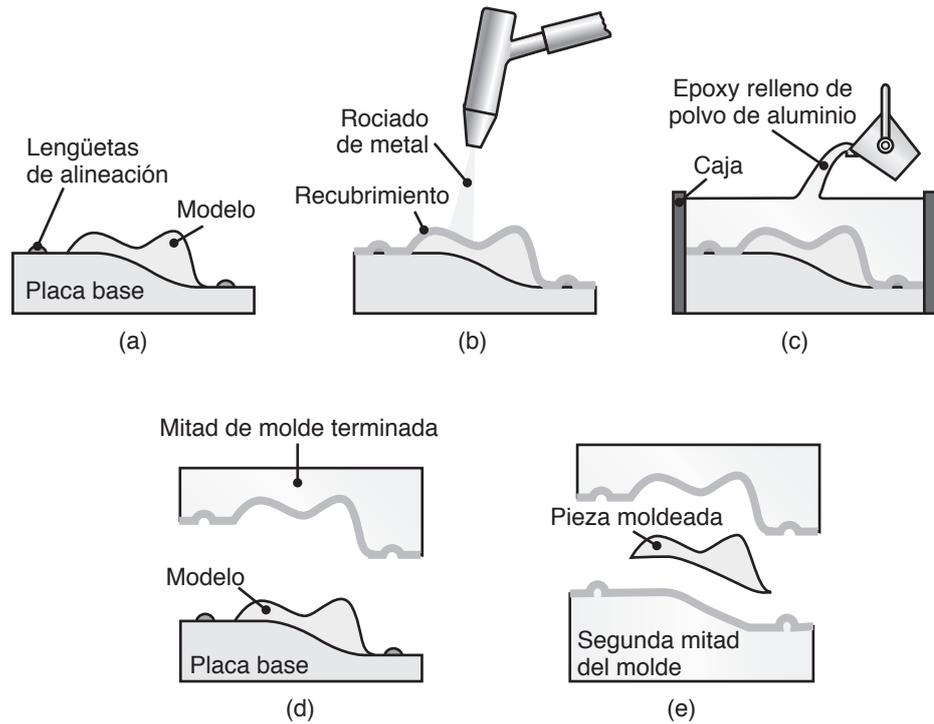


FIGURA 20.19 Producción de herramientas para el moldeo por inyección mediante el proceso de herramientas de metal rociado. (a) Se preparan un modelo y una placa base mediante una operación de prototipado rápido; (b) se rocía una aleación de zinc-aluminio sobre el modelo (vea la sección 34.5); (c) la placa base recubierta y el ensamble del modelo se colocan juntos en una caja que se rellena con epoxy impregnado de aluminio; (d) después del curado, la placa base se retira del molde acabado, y (e) se prepara una segunda mitad de molde adecuada para el moldeo por inyección.

CASO DE ESTUDIO 20.6 Fundición de accesorios de plomería

Un fabricante mundial de aparatos sanitarios y accesorios para baños y cocinas utilizó la creación rápida de herramientas para transformar su proceso de desarrollo de productos. Una de las principales líneas de producto de la compañía consiste en grifos de agua decorativos, fabricados a partir de fundiciones de latón que son pulidas posteriormente para lograr el acabado superficial deseado. La capacidad de producir prototipos de latón resulta esencial para evaluar los diseños e identificar rápidamente las dificultades de procesamiento que pueden presentarse.

Un nuevo diseño de grifo se preparó en un programa CAD, el producto terminado se muestra en la figura 20.20. Como parte del ciclo de desarrollo de productos, se decidió generar prototipos del grifo para confirmar la estética del diseño. Dado que estos gri-

fos se producen típicamente por fundición en arena, también era esencial validar el diseño a través de un proceso de fundición en arena, seguido por el pulido. Este enfoque permitió evaluar las piezas fundidas en términos de porosidad y otros defectos de fundición, así como identificar las dificultades de procesamiento que podrían surgir en las etapas de acabado.

Primero se produjo un molde de arena, como se muestra en la figura 20.21. El material del molde era una mezcla de arena de fundición, yeso y otros aditivos que se combinaron para proporcionar moldes fuertes con buen acabado superficial (vea también la sección 11.2.1). Se imprimió un aglutinante sobre la mezcla de arena para producir el molde; éste podría producirse como una sola pieza, con un corazón integral (vea las figuras 11.3 y 11.6), pero en la práctica frecuentemente



FIGURA 20.20 Nuevo diseño de grifo producido por fundición en moldes de arena de prototipado rápido.

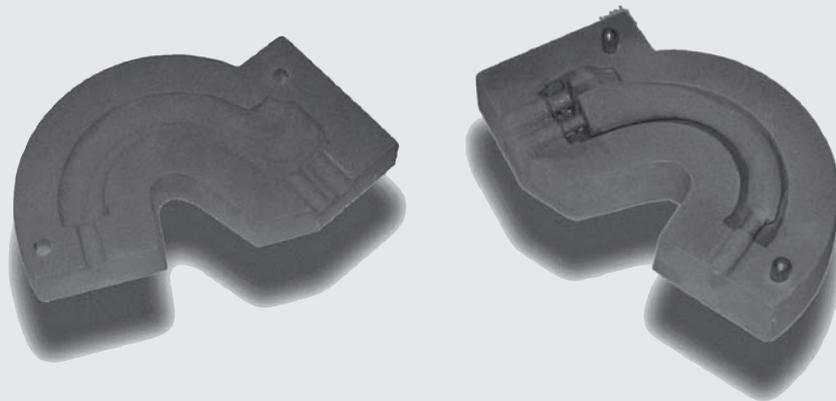


FIGURA 20.21 Moldes de arena producidos mediante impresión tridimensional.

es deseable suavizar el corazón y ensamblarlo después sobre impresiones de corazón. Además, los corazones delgados pueden resultar dañados a medida que el polvo de soporte se retira del molde, especialmente en los diseños de fundición complejos. Por lo tanto, el corazón se produjo por separado y después se ensambló en el molde de dos partes.

Mediante impresión en 3D, la operación produjo prototipos de los grifos de latón en cinco días, los cuales incluyeron el tiempo necesario para el diseño del molde, su impresión, la fundición de los metales y el acabado. El tiempo de impresión real del molde fue un

poco menor a tres horas y el costo del material fue de aproximadamente \$280. La producción de placas modelo para la fundición en arena es, en general, demasiado cara para producir prototipos; costaría más de \$10 000 y añadirá varios meses al tiempo de espera. La incorporación de la impresión 3D en el proceso de diseño proporcionó nuevas capacidades que confirmaron la estética y la función del diseño, así como la robustez de la manufactura y su confiabilidad.

Fuente: Cortesía de Z Corporation.

RESUMEN

- El prototipado rápido continúa creciendo como una disciplina singular de manufactura. Es una tecnología de producción de modelos físicos que resulta útil para identificar y corregir los errores de diseño. Se han desarrollado diversas técnicas para la producción de piezas mediante prototipado rápido.
- El modelado por deposición fundida consiste en un extrusor controlado por computadora, a través del cual se deposita un filamento de polímero para producir una pieza corte por corte.
- La estereolitografía involucra un sistema de enfoque láser controlado por computadora que cura un polímero líquido termofijo que contiene un agente de curado fotosensible.
- Los modelados MultiJet y PolyJet usan mecanismos similares a los cabezales de las impresoras de inyección de tinta para eyectar fotopolímeros y construir prototipos en forma directa.
- La manufactura de objetos laminados utiliza un rayo láser o un cortador de vinilo para realizar primero los cortes en papel u hojas plásticas (laminaciones); luego aplica una capa adhesiva, si es necesario, y finalmente apila las hojas para producir la pieza.
- La impresión tridimensional utiliza un mecanismo de inyección de tinta para depositar gotas de aglutinante líquido sobre polvos poliméricos, metálicos o cerámicos. El proceso relacionado de fabricación de partículas balísticas deposita directamente el material de construcción. Mediante el uso de cabezales impresores múltiples, la impresión tridimensional también puede producir prototipos a todo color.
- El sinterizado selectivo por láser utiliza un rayo láser de alta potencia para sinterizar polvos o revestimientos sobre polvos en un modelo deseado. El sinterizado selectivo por láser se ha aplicado a polímeros, arena, cerámicos y metales. En la fusión por haz de electrones se utiliza el poder de un haz de electrones para fundir los polvos y formar piezas funcionales totalmente densas.
- Las técnicas de prototipado rápido han hecho posible que los tiempos de desarrollo de productos sean mucho más rápidos y están teniendo un efecto importante en otros procesos de manufactura. Cuando se utilizan los materiales adecuados, la maquinaria de prototipado rápido puede producir piezas en bruto para la fundición por revestimiento o para procesos similares, por lo que ahora las piezas metálicas pueden obtenerse rápida y económicamente, incluso para tamaños de lote tan pequeños como una pieza. Estas tecnologías también pueden aplicarse a la producción de moldes para las operaciones (como el moldeo por inyección, la fundición en molde de arena, la fundición en cascarón e incluso el forjado), reduciendo significativamente el tiempo de espera entre el diseño y la manufactura.

TÉRMINOS CLAVE

ACES	Herramientales de metal	Manufactura directa	Prototipado virtual
AIM directo	rociado	Máquinas autorreplicantes	Prototipo
Creación rápida de herramientales	Impresión tridimensional	Modelado MultiJet	Sinterizado selectivo por láser
Curado de suelo sólido	Keltool	Modelado por deposición fundida	
Estereolitografía	Manufactura de escritorio	Moldeo/fundición de uretano por RTV	
Fabricación de sólidos con forma libre	Manufactura de objetos laminados	PolyJet	
Fotopolímero	Manufactura de partículas balísticas	Procesos aditivos	
Fusión por haz de electrones	Manufactura digital	Procesos sustractivos	

BIBLIOGRAFÍA

Bocking, C. E., Rennie, A. y Jacobson, D., **Rapid and Virtual Prototyping and Applications**, Wiley, 2003.

Chua, C. K., Leong, K. F. y Lim, C. S., **Rapid Prototyping: Principles and Applications**, 3a. ed., World Scientific Publishing, 2010.

- Gebhardt, A., *Laser Rapid Prototyping*, Springer, 2005.
- Gebhardt, A., *Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing*, Hanser, 2012.
- Gibson, I., Rosen, D. W. y Stucker, B., *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, 2009.
- Grimm, T., *Users Guide to Rapid Prototyping*, Society of Manufacturing Engineers, 2004.
- Grimm, T., *Engineering Design and Rapid Prototyping*, Springer, 2010.
- Hopkinson, N., Hague, R. y Dickens, R. (eds.), *Rapid Prototyping: An Industrial Revolution for the Digital Age*, Wiley, 2006.
- Kamrani, K. y Nasr, E. A. (eds.), *Rapid Prototyping: Theory and Practice*, Springer, 2006.
- Liou, F. W., *Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox of Prototype Development*, Dekker, 2007.
- Noorani, R. I., *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, Wiley, 2006.
- Pham, D. T. y Dimov, S. S., *Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*, Springer, 2001.
- Venuvinod, P. K. y Ma, W., *Rapid Prototyping: Laser-Based and Other Technologies*, Springer, 2010.
- Wang, W., Stoll, H. y Conley, J. G., *Rapid Tooling Guidelines for Sand Casting*, Springer, 2010.

PREGUNTAS DE REPASO

- 20.1** ¿Cuál es la diferencia básica entre la manufactura aditiva y el prototipado rápido?
- 20.2** ¿Qué es la estereolitografía?
- 20.3** ¿Qué es el prototipado virtual y en qué se distingue de los métodos aditivos?
- 20.4** ¿Qué es el modelado por deposición fundida?
- 20.5** Explique lo que se entiende por creación rápida de herramientas.
- 20.6** ¿Por qué los fotopolímeros son esenciales para la estereolitografía?
- 20.7** Explique lo que significa cada una de las siguientes siglas: (a) 3DP, (b) LOM, (c) STL, (d) SGC, (e) FDM y (f) LENS.
- 20.8** ¿Qué materiales de inicio pueden utilizarse en el modelado por deposición fundida? ¿Y en la impresión tridimensional?
- 20.9** ¿Cuáles son las operaciones de limpieza y acabado en los procesos de prototipado rápido? ¿Por qué son necesarias?
- 20.10** ¿Qué tecnologías de prototipado rápido no requieren un láser?
- 20.11** ¿Cuáles son las ventajas de la fusión por haz de electrones?
- 20.12** ¿Qué es el proceso Keltool?
- 20.13** ¿Qué es una máquina autorreplicante?
- 20.14** ¿Qué operaciones de prototipado rápido pueden producir piezas de trabajo transparentes?
- 20.15** ¿Qué operaciones de prototipado rápido pueden producir piezas multicolores?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 20.16** ¿Cómo puede producirse un molde para fundición en arena usando técnicas de prototipado rápido? Explique.
- 20.17** Examine una taza de café cerámica y determine la orientación que usted elegiría para producir la pieza si estuviera utilizando (a) manufactura por deposición fundida o (b) manufactura de objetos laminados.
- 20.18** ¿Cómo fabricaría usted rápidamente herramientas para el moldeo por inyección? Explique las dificultades que podría encontrarse.
- 20.19** Explique la importancia de la creación rápida de herramientas en la manufactura.
- 20.20** Liste los procesos descritos en este capítulo que son los más adecuados para producir piezas de cerámica. Explique su respuesta.
- 20.21** En la actualidad, se fabrican pocas piezas de productos comerciales directamente a través de operaciones de prototipado rápido. Explique las posibles razones.
- 20.22** ¿Las piezas de prototipado rápido pueden ser hechas de papel? Explique su respuesta.
- 20.23** El análisis cuidadoso de una pieza de prototipado rápido indica que está hecha de capas con contorno visible de filamento distinto en cada capa. ¿El material es un termofijo o un termoplástico? Explique su respuesta.
- 20.24** ¿Por qué las piezas de metal producidas en la impresión tridimensional suelen infiltrarse con otro metal?
- 20.25** Liste las ventajas y desventajas de cada una de las operaciones de prototipado rápido que se describen en este capítulo.
- 20.26** Al hacer un prototipo de un automóvil de juguete, liste las operaciones de acabado posteriores al prototipado rápido que usted considera serían necesarias. Explique.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

20.27 Usando un costo aproximado de \$400 por galón de polímero líquido, estime el costo de material para la representación de prototipado rápido de un ratón de computadora típico.

20.28 En una preparación de modelado por deposición fundida, el cabezal extrusor tiene un diámetro de 1.25 mm (0.05 pulg) y produce capas que tienen un espesor de 0.25 mm (0.01 pulg). Si las velocidades del cabezal extrusor y del extruido del polímero son ambas de 40 mm/s, estime el tiempo de producción necesario para generar un cubo sólido de 38 mm (1.5 pulg). Suponga que hay un retardo de 10 segundos entre capas cuando el cabezal extrusor se desliza sobre un cepillo de alambre para limpiarse.

20.29 Utilizando los datos del problema 20.28 y suponiendo que la porosidad del material de soporte es del 50%, calcule la tasa de producción para la fabricación de una taza con 100 mm (4 pulg) de altura, diámetro exterior de 90 mm (3.5 pulg) y espesor de pared de 4 mm (0.16 pulg). Considere los casos (a) con el extremo cerrado hacia arriba y (b) con el extremo cerrado hacia abajo.

20.30 Inspeccione la tabla 20.2 y compare los valores numéricos dados con aquellos de los metales y otros materiales que se pueden encontrar en la parte I de este texto. Comente sus observaciones.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

20.31 Las máquinas de prototipado rápido representan una gran inversión de capital y, en consecuencia, pocas empresas pueden justificar la compra de su propio sistema. Por lo tanto, se han vuelto comunes las empresas de servicios que producen piezas con base en los dibujos de sus clientes. Realice una encuesta informal de este tipo de empresas de servicios, identifique las clases de máquinas de prototipado rápido que utilizan y determine el porcentaje de uso de cada tipo.

20.32 Una de las principales ventajas de la estereolitografía es que puede utilizar polímeros transparentes, de manera que los detalles internos de las piezas pueden verse con facilidad. Liste y describa varias piezas en las que esta característica sea valiosa.

20.33 Se propone una técnica de manufactura que utiliza una variación del modelado por deposición fundida, en ésta hay dos filamentos de polímero que se funden y se mezclan antes de ser extruidos para hacer la pieza. ¿Qué ventajas tiene este método?

20.34 Identifique los procesos de prototipado rápido descritos en este capítulo que pueden realizarse con materiales disponibles en su casa o que usted pueda comprar fácilmente a un bajo costo. Explique cómo los llevaría a cabo. Considere materiales como la madera contrachapada delgada, papel grueso, pegamento y mantequilla, así como el uso de diversas herramientas y fuentes de energía.

20.35 Diseñe una máquina que utilice las tecnologías de prototipado rápido para producir esculturas de hielo. Describa sus

características básicas y comente el efecto del tamaño y la complejidad de la forma en su diseño.

20.36 Debido a la liberación de esfuerzos residuales durante el curado, las salientes largas sin soporte en las piezas hechas por estereolitografía tienden a curvarse. Proponga métodos para controlar o eliminar este problema.

20.37 Describa los métodos que permitirían el uso de polímeros reforzados en el prototipado rápido.

20.38 Realice un estudio en internet y en la literatura pertinente para escribir un documento de dos páginas sobre los desarrollos que han tenido lugar en la producción de órganos artificiales mediante procesos de prototipado rápido relacionados.

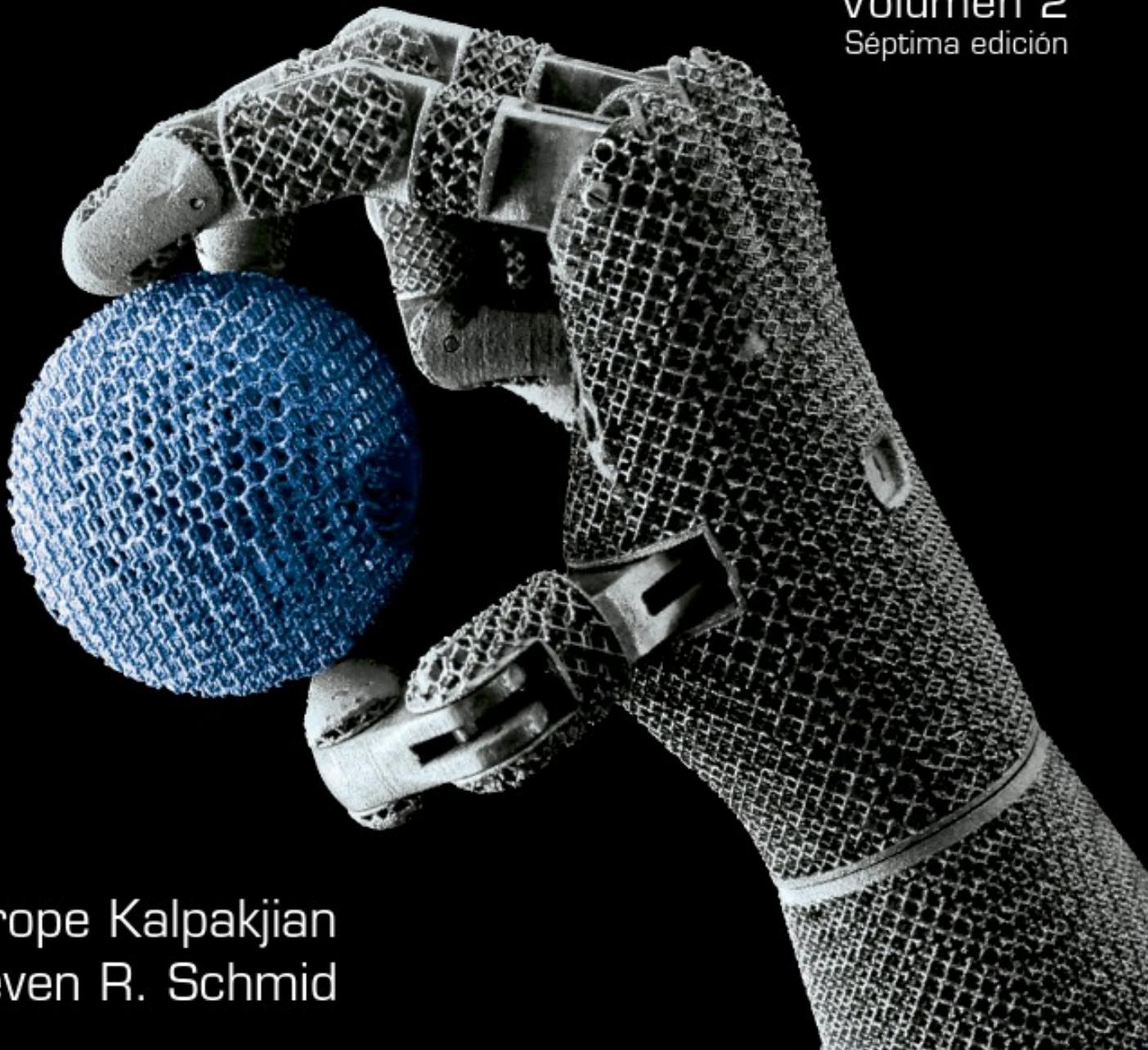
20.39 Un tema actual de investigación involucra la producción de piezas provenientes de operaciones de prototipado rápido y su uso en el análisis experimental del esfuerzo con el fin de inferir la resistencia de las piezas finales producidas mediante operaciones de manufactura convencionales. Liste sus preocupaciones con respecto a este enfoque y esquematice los medios para hacer frente a dichas preocupaciones.

20.40 Describa el método que usted utilizaría para producir prototipos de pequeños engranes de plástico. Suponga que los engranes tienen 100 mm de diámetro, 25 mm de grosor y poseen 25 dientes. Explique cómo cambiaría su método preferido de producción si debiese producir (a) un engrane; (b) 100 engranes por mes; (c) 100 por día, y (d) 100 por hora.

MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Procesos de manufactura

Volumen 2
Séptima edición



Serope Kalpakjian
Steven R. Schmid

Procesos de maquinado y máquinas herramientas

PARTE IV

Las partes o piezas manufacturadas por medio de los procesos de fundición, conformado y para dar forma, descritos en las partes II y III, incluyendo muchas elaboradas con métodos que dan la forma neta o cercana a ella, con frecuencia requieren de operaciones adicionales antes de que el producto esté listo para usarse. Por ejemplo, consideremos las siguientes características de las partes y si podrían producirse mediante los procesos descritos hasta aquí:

- Superficies suaves y brillantes, como las de las áreas de rodamiento del cigüeñal mostrado en la figura IV.1.
- Orificios profundos y de diámetro pequeño en una pieza, como la boquilla del inyector que se muestra en la figura IV.2.
- Piezas con elementos agudos, una sección roscada y tolerancias dimensionales específicas cerradas, como las de la pieza que aparece en la figura IV.3.
- Un orificio roscado o perforaciones en diferentes superficies de una pieza para ensamblarla con otros componentes.
- Geometrías difíciles y complejas, con frecuencia en materiales duros o de alto desempeño que no pueden producirse fácil o económicamente en las cantidades deseadas utilizando los procesos ya descritos en el libro (vea la figura 25.1).
- Acabados superficiales y texturas especiales para fines prácticos o de apariencia.

Pronto quedará claro que ninguno de los procesos descritos en los capítulos anteriores es capaz de producir partes con las características específicas recién mencionadas. Por esto, las partes requerirán más procesamiento, el cual generalmente es conocido como *secundario* y como *operaciones de acabado*. La palabra **maquinado** es un término general que se utiliza para describir un grupo de procesos que consisten en la remoción de material y **modificación** de las superficies de la pieza que se trabaja después de que ha sido producida mediante los diferentes métodos. La gran variedad de formas producidas por el maquinado puede observarse en un automóvil, como se ilustra en la figura IV.4.

Al revisar el contenido de las partes II y III de este libro, se recordará que ciertas piezas sí pueden ser producidas con su forma definitiva (forma neta) y en grandes cantidades. Sin embargo, el maquinado puede ser más económico siempre y cuando el número de piezas requerido sea relativamente pequeño o el material y la forma permitan que las piezas se maquinen a altas velocidades, en grandes cantidades y con gran exactitud



FIGURA IV.1 Cigüeñal forjado que se muestra antes y después de ser maquinadas las superficies de rodamiento. Las zonas brillantes de la parte derecha no pueden elaborarse hasta sus dimensiones finales ni tener ese acabado de la superficie utilizando cualquiera de los procesos descritos en los capítulos anteriores de este libro. *Fuente:* Cortesía de Wyman-Gordon Company.

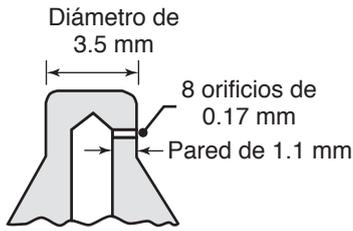


FIGURA IV.2 Sección transversal de una boquilla inyectora de combustible que muestra un pequeño orificio hecho mediante un proceso de electroerosión (o maquinado por descarga eléctrica), como se describe en la sección 27.5. El material es acero tratado térmicamente.

en sus dimensiones. Un buen ejemplo de esto es la producción de **piezas de latón para atornillarse en una máquina por medio de maquinaria automática de pernos múltiples.**

Sin embargo, en general, recurrir al maquinado con frecuencia sugiere que una pieza no podría producirse hasta sus especificaciones finales deseadas por medio de los procesos primarios usados en su fabricación, de modo que son necesarias operaciones adicionales. De nuevo, enfatizamos la importancia de la manufactura de forma neta, como se describió en la sección I.6, con el fin de evitar estos pasos adicionales y reducir los costos de producción.

No obstante, a pesar de sus ventajas, los procesos de remoción de material tienen ciertas desventajas:

- *Desperdician material*, aun cuando la cantidad pueda ser relativamente pequeña.
- Por lo general, requieren de *más tiempo* que otros procesos de manufactura.
- En general requieren *más energía* que las operaciones de conformado mecánico y para dar forma al material.
- Pueden tener *efectos adversos* en la calidad de la superficie y en las propiedades del producto.

Como se ilustra en la figura I.5e, en la introducción general, el maquinado consiste en varios tipos de procesos de remoción de material:

- **Corte**, es común que involucre herramientas de corte de un solo **punto** o de puntos múltiples, cada uno con una forma claramente definida (capítulos 23 a 25).
- **Procesos abrasivos**, tales como el esmerilado y otros procesos afines (capítulo 26).
- **Procesos de maquinado avanzado**, es común que usen métodos eléctricos, químicos, de láser, térmicos e hidrodinámicos (capítulo 27).

Las máquinas en las que se efectúan estas operaciones se llaman **máquinas herramientas**. Como se observa en la tabla I.2 en la introducción general, las primeras herramientas primitivas, que datan de hace varios milenios, se hicieron con el propósito principal de astillar y cortar todo

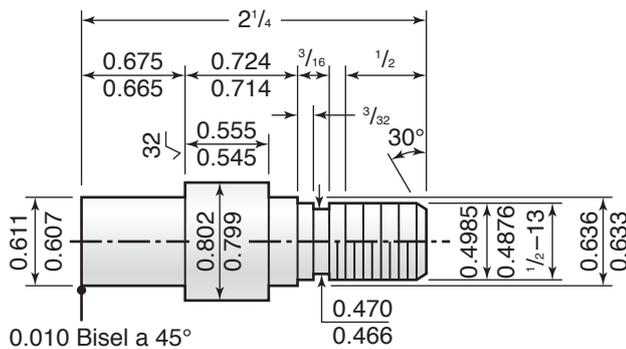


Figura IV.3 Pieza maquinada y con cuerda incluyendo varias dimensiones y tolerancias, todas las dimensiones están en pulgadas. Observe que ciertas tolerancias son de apenas milésimos de pulgada.

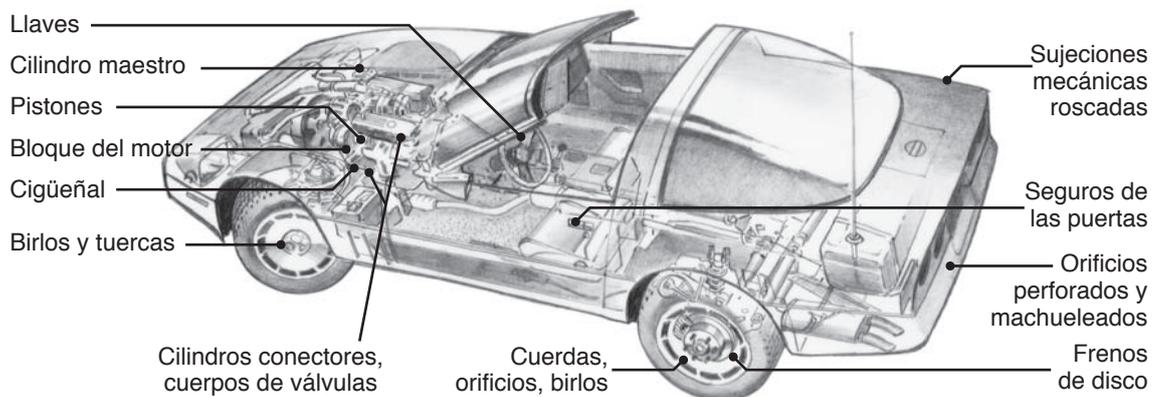


FIGURA IV.4 Piezas comunes de un automóvil que requieren operaciones de maquinado para darles las formas, características superficiales, dimensiones y tolerancias deseadas.

tipo de materiales naturales, como madera, piedra, plantas y animales cazados. También observemos que en el siglo xvi comenzaron los desarrollos para fabricar productos mediante operaciones de maquinado, en particular con la introducción del torno. En comparación con aquellas sencillas maquinarias y herramientas empleadas, hoy se dispone de una amplia variedad de herramientas y máquinas controladas por computadora y de técnicas avanzadas para fabricar piezas funcionales tan pequeñas como insectos diminutos y con secciones transversales mucho más pequeñas que un cabello.

Igual que todas las operaciones de manufactura, resulta esencial ver las de maquinado como un *sistema* que consiste en (a) pieza de trabajo, (b) herramienta de corte, (c) máquina herramienta y (d) operador.

En los siete capítulos siguientes se describe la mecánica básica de la formación de virutas en el maquinado; esto incluye las fuerzas involucradas en la herramienta, requerimientos de potencia, temperatura, desgaste de la herramienta, acabado e integridad de la superficie de la pieza maquinada, herramientas de corte y fluidos de corte. Después se describen los procesos específicos de maquinado, inclusive sus capacidades, limitaciones y aplicaciones comunes, además de las características importantes de las máquinas herramientas empleadas en operaciones básicas tales como el torneado, fresado, perforado o torneado interno (o mandrinado), taladrado y machueleado.

Después se describen las características de los *centros de maquinado*, que son máquinas herramientas versátiles controladas por computadora y capaces de ejecutar con eficiencia varias operaciones. El siguiente grupo de procesos descritos lo constituyen aquellos en que se lleva a cabo la remoción de material por medio de **procesos abrasivos** y sus operaciones relacionadas para lograr una precisión dimensional y un acabado superficial muy altos. Por razones técnicas y económicas, algunas piezas no pueden maquinarse satisfactoriamente con procesos de corte o abrasivos. Desde la década de 1940, han ocurrido importantes adelantos en los **procesos de maquinado avanzado** que incluyen aquellos que pueden ser químicos, electroquímicos, por electroerosión, por rayo láser, por haz de electrones, mediante chorro abrasivo y por maquinado hidrodinámico, los cuales serán descritos en el resto de esta parte IV.

21.1 Introducción 566
 21.2 Mecánica de corte 567
 21.3 Fuerzas y potencia en el proceso de corte 577
 21.4 Temperaturas durante el proceso de corte 580
 21.5 Vida de la herramienta: desgaste y falla 582
 21.6 Acabado e integridad de la superficie 589
 21.7 Maquinabilidad 591

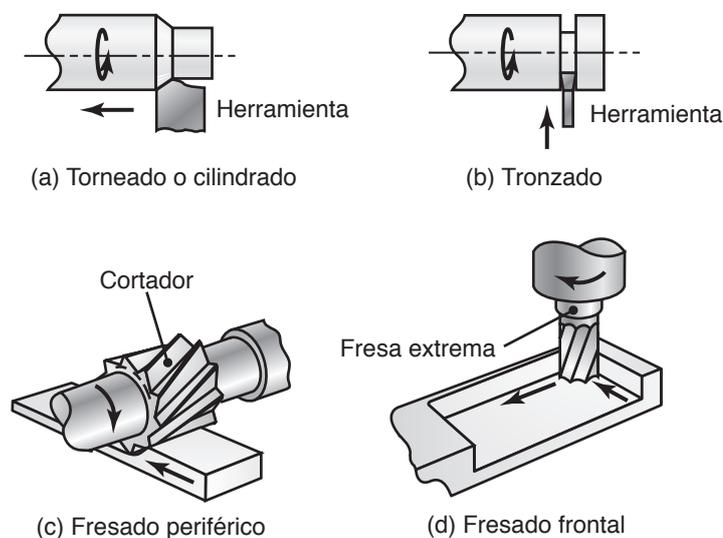
EJEMPLOS:

21.1 Energías relativas en el corte 580
 21.2 Incremento de la vida de la herramienta mediante la reducción de la velocidad de corte 585
 21.3 Efecto de la velocidad de corte en la remoción de material 586

- Este capítulo es una introducción a los fundamentos de los procesos de maquinado y presenta los conceptos básicos aplicables a todas las operaciones de maquinado.
- El capítulo inicia con una descripción de la mecánica de la formación de virutas en el maquinado e incluye el modelo que se usa comúnmente para las operaciones básicas de corte y que permiten el cálculo de la fuerza y potencia del maquinado.
- Se estudia el incremento en la temperatura y su importancia en cuanto a la pieza de trabajo y al desempeño de la herramienta de corte, así como el mecanismo de desgaste de la herramienta.
- El capítulo concluye con el análisis del acabado superficial, de la integridad de las partes producidas por medio de maquinado y de los factores involucrados en la maquinabilidad de los materiales metálicos y no metálicos.

21.1 Introducción

Los procesos de corte eliminan material de las distintas superficies de una pieza de trabajo por medio de la producción de **virutas**. Algunos de los procesos de corte más comunes, ilustrados en la figura 21.1 (vea también la figura I.5e), son los siguientes:



- **Torneado (cilindrado)**, en el que la pieza de trabajo gira y una herramienta de corte elimina una capa de material a medida que la herramienta se desplaza a lo largo de la longitud de la pieza, como se muestra en la figura 21.1a.
- **Tronzado**, en el que la herramienta se desplaza hacia dentro en forma radial y separa la pieza que aparece a la derecha en la figura 21.1b a partir de la pieza en bruto.
- **Fresado periférico**, en el que una herramienta de corte giratoria retira una capa de material de la superficie de la pieza de trabajo (figura 21.1c).
- **Fresado frontal**, en el que un cortador giratorio se desplaza a lo largo de cierta profundidad en la pieza de trabajo y produce una cavidad o caja (figura 21.1d).

En el proceso de torneado, el cual se ilustra con más detalle en la figura 21.2, la herramienta de corte o buril es posicionada a cierta *profundidad de corte* (en milímetros o pulgadas) y se desplaza

FIGURA 21.1 Ejemplos de operaciones de maquinado comunes.

hacia la izquierda a cierta velocidad mientras la pieza de trabajo gira. El *avance* es la distancia que viaja la herramienta por cada giro que hace la pieza de trabajo (mm/rev o pulg/rev); este movimiento de la herramienta de corte produce una viruta, que se mueve sobre la cara de incidencia o superficie de ataque de la herramienta.

Para analizar este proceso básico con más detalle, en la figura 21.3a se presenta un modelo bidimensional. En este modelo *idealizado*, una herramienta de corte se desplaza hacia la izquierda a lo largo de la pieza de trabajo a velocidad constante, V , y a cierta profundidad de corte, t_o . Se produce una viruta sobre la herramienta por deformación plástica y corta el material continuamente a lo largo del *plano de corte*. Este fenómeno se demuestra fácilmente raspando despacio el largo de la superficie de una barra de mantequilla con un cuchillo afilado y observando cómo se produce una viruta. Las raspaduras de chocolate usadas para decorar pasteles y postres también se producen en una forma similar.

Al comparar las figuras 21.2 y 21.3, observemos que el avance en el torneado es equivalente a t_o y que la profundidad de corte en esta misma operación equivale al ancho del corte (es decir, la dimensión perpendicular a la página). Estas relaciones dimensionales se pueden visualizar al realizar un giro de 90° a la figura 21.3 en el sentido de las manecillas del reloj. Con esta breve introducción como antecedente, a continuación se describirá el proceso de corte con mucho mayor detalle.

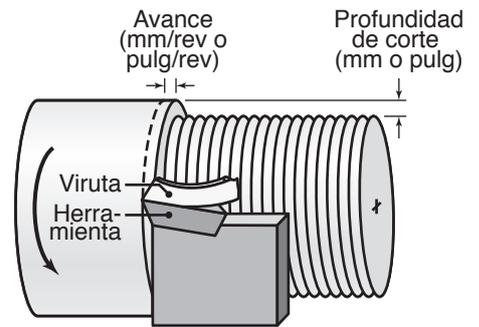


FIGURA 21.2 Ilustración esquemática de la operación de torneado mostrando diversas características; se ha exagerado el acabado de la superficie para mostrar las marcas producidas por el avance.

21.2 Mecánica de corte

Los factores que influyen en el proceso de corte se mencionan en la tabla 21.1. Con el fin de apreciar el contenido de ésta, observemos que las principales *variables independientes* en el proceso básico de corte son: (a) el material de la herramienta y los recubrimientos, si los hubiera; (b) la forma de la herramienta, acabado de la superficie y filo; (c) el material de la pieza de trabajo y su historia de procesamiento; (d) la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte; (e) los fluidos de corte, si los hubiera; (f) las características de la máquina herramienta y (g) el tipo de dispositivo para sujetar la pieza de trabajo y los accesorios.

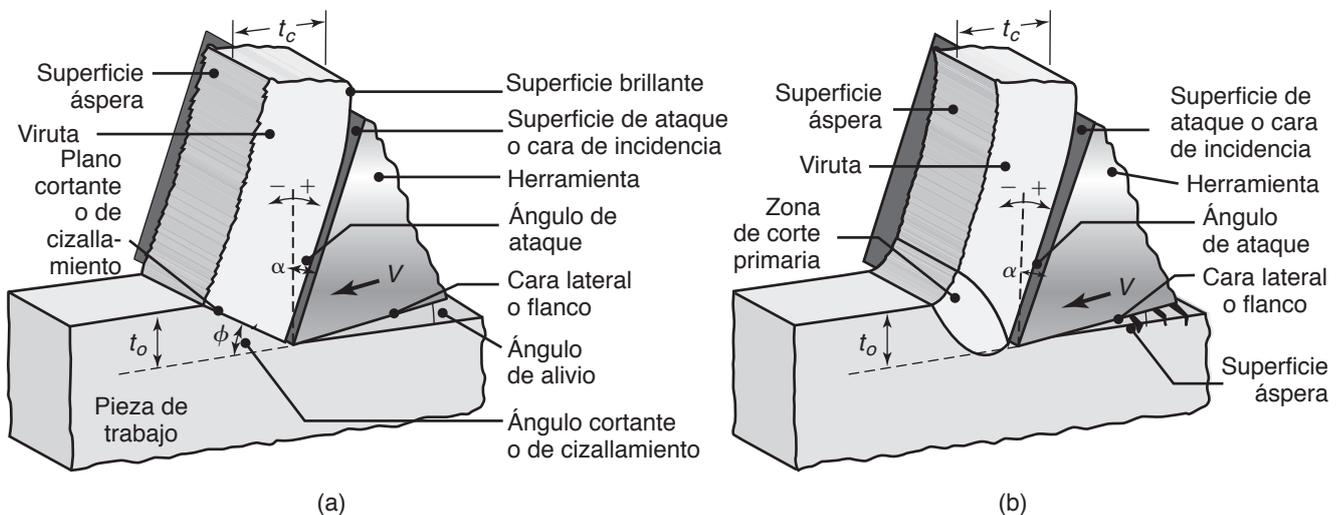


FIGURA 21.3 Ilustración esquemática de un proceso de corte bidimensional, también llamado corte ortogonal: (a) corte ortogonal con un plano de corte bien definido, también conocido como el modelo de M. E. Merchant. Observe que la forma de la herramienta, la profundidad de corte, t_o , y la velocidad de corte, V , son todas variables independientes. (b) Corte ortogonal sin un plano de corte bien definido.

TABLA 21.1

Factores que influyen en las operaciones de maquinado	
Parámetro	Influencia e interrelación
Velocidad de corte, profundidad de corte, avance, fluidos de corte	Fuerzas, potencia, aumento de temperatura, vida de la herramienta, tipo de viruta, acabado e integridad de la superficie.
Ángulos de la herramienta	Todos los anteriores e influencia en la dirección de flujo de la viruta; resistencia al desgaste de la herramienta y a la producción de viruta.
Viruta continua	Buen acabado superficial; fuerzas de corte estables; no es deseable, sobre todo en las máquinas herramientas modernas.
Formación de borde acumulado (<i>built-up edge</i>)	Mal acabado de la superficie y de su integridad; si es delgado y estable, el borde acumulado puede proteger las superficies de la herramienta.
Viruta discontinua	Deseable por la facilidad de eliminarla; fuerzas de corte fluctuantes; puede afectar el acabado de la superficie; puede ocasionar daño térmico a la superficie de trabajo y generar vibración y movimiento.
Aumento de temperatura	Influye en la vida de la herramienta, en particular en el desgaste por depresiones y en la precisión dimensional de la pieza de trabajo; puede causar daño térmico a la superficie de la pieza de trabajo.
Desgaste de la herramienta	Influye en el acabado y la integridad de la superficie, la precisión dimensional, el aumento de temperatura, y en fuerzas y potencia.
Maquinabilidad	Relacionada con la vida de la herramienta, el acabado superficial, fuerzas y potencia, además del tipo de viruta producida.

En el proceso de corte, las *variables dependientes* son aquellas que se ven influidas por los cambios ocurridos en las variables independientes listadas anteriormente. Estas variables dependientes incluyen: (a) tipo de viruta producida; (b) fuerza y energía disipada durante el corte; (c) aumento de temperatura en la pieza de trabajo, la herramienta y la viruta; (d) desgaste y falla de la herramienta y (e) acabado e integridad de la superficie de la pieza de trabajo.

La importancia de establecer relaciones *cuantitativas* entre las variables independientes y dependientes al maquinar, se aprecia mejor cuando se plantean ciertas cuestiones típicas, a saber: ¿cuál de las variables independientes debe cambiarse primero y en qué grado si (a) el acabado de la superficie de la pieza de trabajo que se maquina es inaceptable, (b) la herramienta de corte se desgasta con rapidez y pierde filo, (c) la pieza de trabajo se calienta mucho y (d) la herramienta comienza a vibrar y a moverse?

Con el fin de entender estos fenómenos y responder la pregunta planteada, resulta esencial estudiar primero la mecánica de la formación de virutas. Dicho tema se ha estudiado mucho desde principios de la década de 1940. Para describir el proceso de corte se han propuesto varios modelos con distinto grado de complejidad. Igual que sucede en muchas otras operaciones de manufactura, continuamente se desarrollan modelos avanzados de maquinado, incluyendo especialmente la *simulación por computadora* del proceso de maquinado básico. A su vez, el estudio de las complejas interacciones que tienen lugar entre las numerosas variables involucradas ayuda a desarrollar capacidades de optimización de las operaciones de maquinado y a minimizar costos.

El modelo simple mostrado en la figura 21.3a, conocido como el modelo de M. E. Merchant, y desarrollado a principios de la década de 1940, es suficiente para los propósitos de esta introducción. Este modelo también es conocido como de **corte ortogonal** porque es bidimensional y las fuerzas involucradas son perpendiculares entre sí. La herramienta de corte tiene un **ángulo de ataque**, α (positivo, como se aprecia en la figura), y un **ángulo de salida** o de **ahusamiento**.

El examen microscópico de las virutas producidas en las operaciones de maquinado reales ha revelado que se producen por *cizallamiento* (como se modela en la figura 21.4a), fenómeno similar al movimiento de una pila de cartas que se deslicen una sobre la otra (vea también la figura 1.6). El cizallamiento tiene lugar dentro de una **zona de cizallamiento** (por lo general a lo largo de un plano bien definido conocido como **plano de cizallamiento**) con un ángulo ϕ (llamado **ángulo cortante** o de **cizallamiento**). Bajo el plano de cizallamiento, la pieza de trabajo permanece sin deformar; sobre el plano, la viruta (una vez formada) se mueve sobre la superficie de ataque de la herramienta. La dimensión d

se ha exagerado mucho en la figura con el fin de mostrar el mecanismo involucrado en la formación de la viruta. En realidad, se ha encontrado que esta dimensión es del orden de sólo 10^{-2} a 10^{-3} mm (10^{-3} a 10^{-4} pulg).

Ciertos materiales, en forma notable el hierro fundido a bajas velocidades, no se cizallan a lo largo de un plano bien definido sino dentro de una zona, como se aprecia en la figura 21.3b. La forma y el tamaño de esta zona es importante en la operación de maquinado, como se estudiará en la sección 21.2.1.

Razón de corte. En la figura 21.3a se observa que el espesor de la viruta, t_v , se puede determinar a partir de la profundidad de corte, t_o , el ángulo de ataque, α , y el ángulo cortante, ϕ . La razón de t_o/t_c es conocida como **razón de corte** (o *relación viruta-espesor*), r , y se relaciona con los dos ángulos ϕ y α por medio de las relaciones siguientes:

$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \tag{21.1}$$

y

$$r = \frac{t_o}{t_c} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \tag{21.2}$$

Debido a que el espesor de la viruta siempre es mayor que la profundidad de corte, el valor de r siempre es menor que la unidad. El recíproco de r se conoce como la *razón de viruta-compresión* o *factor de viruta-compresión* y es una medida de qué tan gruesa se ha hecho la viruta en comparación con la profundidad de corte; entonces, la razón de viruta-compresión siempre es mayor que la unidad. Tal como puede observarse al revisar la figura 21.3a, la profundidad de corte se conoce también como *espesor de la viruta no deformada*.

La razón de corte es un parámetro importante y útil para evaluar las condiciones de corte. Dado que el espesor de la viruta no deformada, t_o , se especifica fácilmente como un ajuste de la máquina, por lo que es conocido, la razón de corte se puede calcular midiendo el espesor de la viruta con un micrómetro. Con el ángulo de ataque también conocido para una operación particular de corte (porque está en función de la herramienta y la geometría de la pieza de trabajo en cuestión), la ecuación (21.1) permite el cálculo del ángulo de cizallamiento.

Aunque a t_o se le conoce como la *profundidad de corte*, observe que en un proceso de maquinado como el torneado (que se muestra en la figura 21.2), esta cantidad es el *avance* o la *velocidad de avance* expresada en la distancia recorrida por cada revolución de la pieza de trabajo. Suponga, por ejemplo, que la pieza de trabajo mostrada en la figura 21.2 es un tubo de pared delgada y que el ancho del corte mide lo mismo que el espesor del tubo. Entonces, si se gira 90° la figura 21.3 en el sentido de las manecillas del reloj, la figura será similar a la vista en la figura 21.2.

Deformación cortante (o de cizallamiento). En relación con la figura 21.4a, podemos ver ahora que la *deformación cortante*, γ , a la que es llevado el material puede expresarse como

$$\gamma = \frac{AB}{OC} = \frac{AO}{OC} + \frac{OB}{OC},$$

o bien

$$\gamma = \cot \phi + \tan(\phi - \alpha). \tag{21.3}$$

Observe que las deformaciones cortantes grandes se asocian con (a) ángulos de cizallamiento bajos o (b) ángulos de ataque pequeños o negativos. Se han observado defor-

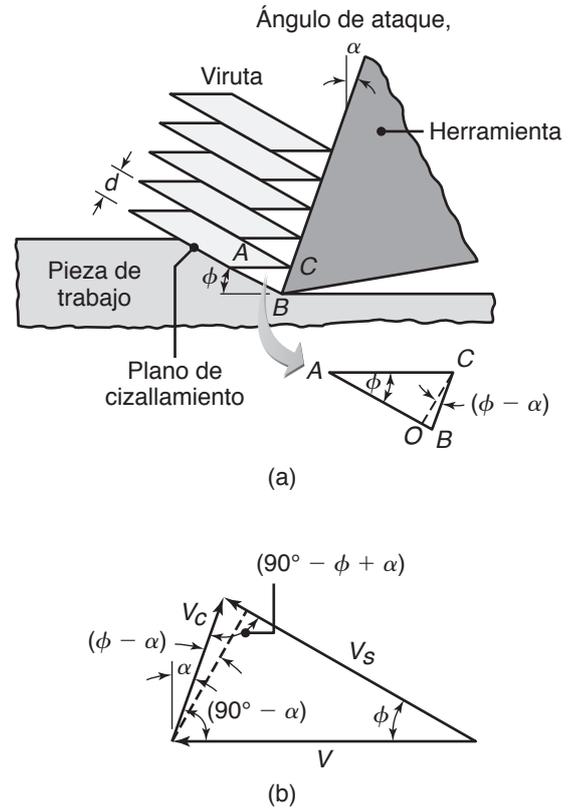


FIGURA 21.4 (a) Ilustración esquemática del mecanismo básico de la formación de viruta por cizallamiento. (b) Diagrama de velocidad que muestra las relaciones angulares entre las tres velocidades presentes en la zona de corte.



Código QR 21.1 Medición de las deformaciones durante el corte de metal. (Fuente: Cortesía del National Institute of Standards and Technology).

maciones cortantes de cinco o mayores en operaciones reales de corte. En comparación con los procesos de conformado o para dar forma, el material de la pieza de trabajo sufre una deformación mayor durante el corte, como también se aprecia en la tabla 2.4. Además, la deformación durante el corte por lo general tiene lugar dentro de una zona muy angosta; en otras palabras, la dimensión $d = OC$ mostrada en la figura 21.4a es muy pequeña. Así, la rapidez a que ocurre el cizallamiento es elevada (la naturaleza y el tamaño de la zona de deformación se estudiarán más en la sección 21.3).

El ángulo del plano de cizallamiento tiene un significado mayor en la mecánica de las operaciones de corte ya que influye en los requerimientos de fuerza y potencia, en el espesor de la viruta y en el aumento de la temperatura al maquinar. Uno de los primeros análisis en relación con el ángulo del plano de cizallamiento se basó en la suposición de que dicho ángulo se ajusta a sí mismo para minimizar la fuerza de corte, o que el plano de cizallamiento es un plano de esfuerzo cortante máximo. Este análisis produjo la expresión siguiente:

$$\phi = 45^\circ + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}, \quad (21.4)$$

donde β es el **ángulo de fricción** y se relaciona con el *coeficiente de fricción*, μ , en la interfase herramienta-viruta por medio de la expresión $\mu = \tan \beta$. Entre varias relaciones del ángulo de cizallamiento que se han desarrollado, otra fórmula aproximada pero útil es la siguiente:

$$\phi = 45^\circ + \alpha - \beta. \quad (21.5)$$

En el corte de metal, se ha encontrado que por lo general el coeficiente de fricción está en un rango de alrededor de 0.5 a 2 (vea también la sección 33.4), lo cual indica que la viruta encuentra una resistencia considerable por fricción a medida que se desplaza sobre la superficie de ataque de la herramienta. Los experimentos han demostrado que μ varía en forma considerable a lo largo de la interfase herramienta-viruta debido a las grandes variaciones en la presión de contacto y la temperatura. En consecuencia, μ también recibe el nombre de *coeficiente de fricción media aparente*.

La ecuación (21.4) indica que (a) conforme el ángulo de ataque disminuye o aumenta la fricción en la interfase herramienta-viruta, el ángulo cortante disminuye y la viruta se hace más gruesa; (b) una viruta más gruesa significa mayor disipación de energía porque la deformación cortante es más grande, como se observa en la ecuación (21.2), y (c) como el trabajo realizado durante el corte se convierte en calor, el aumento de temperatura también es mayor.

Velocidades en la zona de corte. En la figura 21.3, observe que como el espesor de la viruta es mayor que la profundidad de corte, la velocidad de la viruta, V_c , tiene que ser menor que la velocidad de corte, V . Como la continuidad de la masa ha de conservarse,

$$Vt_o = V_c t_c \quad \text{o bien} \quad V_c = V_r,$$

por lo tanto,

$$V_c = \frac{V \sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)}. \quad (21.6)$$

También puede construirse un *diagrama de velocidad*, como se aprecia en la figura 21.4b, en el cual, a partir de relaciones trigonométricas, se puede demostrar que

$$\frac{V}{\cos(\phi - \alpha)} = \frac{V_s}{\cos \alpha} = \frac{V_c}{\sin \phi}, \quad (21.7)$$

donde V_s es la velocidad a que tiene lugar el cizallamiento en el plano de cizallamiento; también observe que

$$r = \frac{t_o}{t_c} = \frac{V_c}{V}. \quad (21.8)$$

Estas relaciones de velocidad se utilizarán más en la sección 21.3, cuando se describan los requerimientos de potencia en las operaciones de corte.

21.2.1 Tipos de virutas producidas en el corte de metal

En la figura 21.5 se muestran los tipos de virutas de metal que es común observar en la práctica, así como sus microfotografías. Los cuatro tipos principales son:

- Continuas.
- Borde acumulado.
- Escalonada o segmentada.
- Discontinua.

Observe que una viruta tiene dos superficies. Una de éstas ha estado en contacto con la superficie de ataque de la herramienta y tiene un aspecto brillante y quemado causado por deslizamiento a medida que la viruta se desplaza sobre la cara de la herramienta. La otra superficie es la exterior de la pieza de trabajo. Tiene un aspecto dentado y burdo,



Código QR 21.2 Corte de acero que muestra un borde acumulado (BUE, por sus siglas en inglés). (Fuente: Cortesía del National Institute of Standards and Technology).

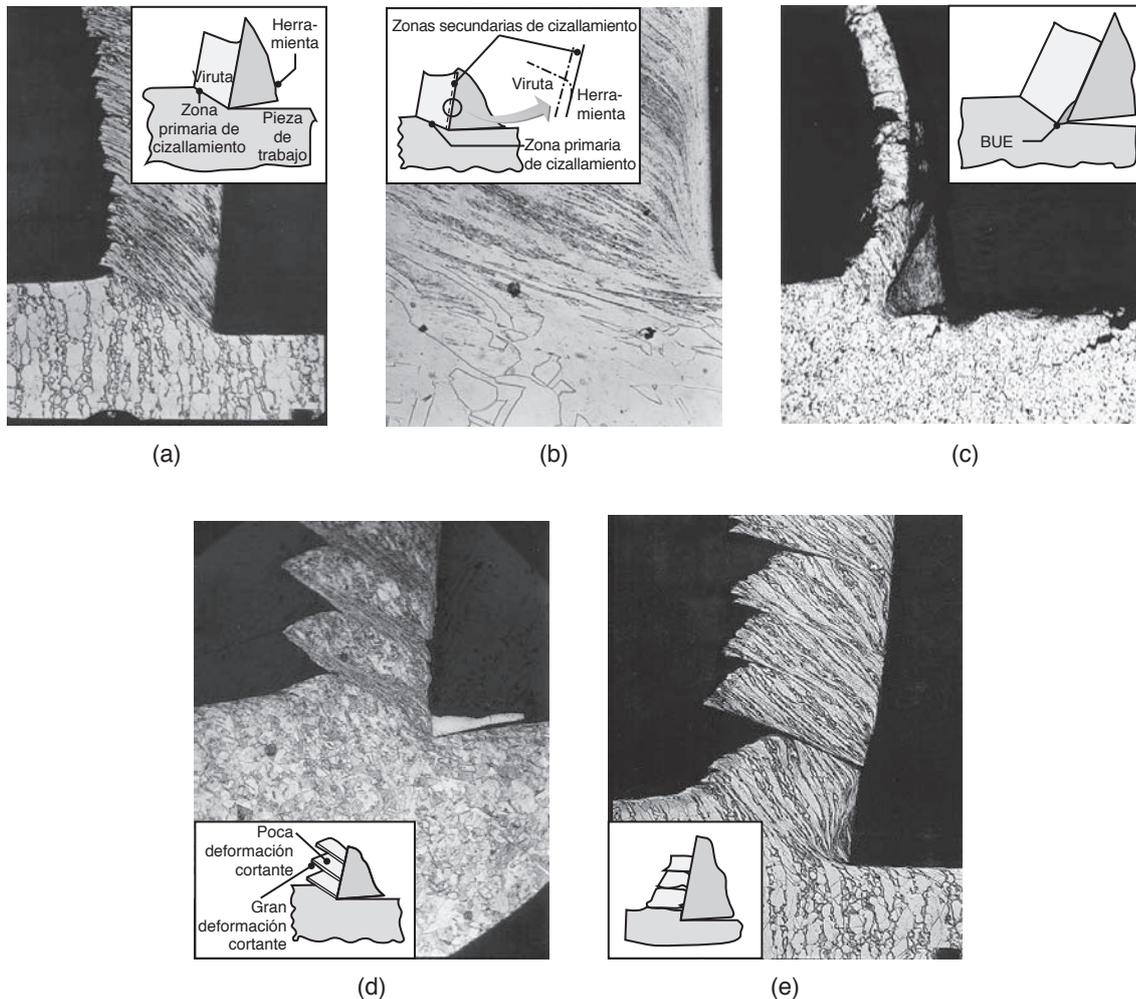


FIGURA 21.5 Tipos básicos de virutas producidas durante el corte ortogonal de metal, su representación esquemática y microfotografías de la zona de corte: (a) viruta continua con zona de corte angosta, recta y primaria; (b) viruta continua con zona de corte en la interfase viruta-herramienta; (c) viruta de borde acumulado; (d) viruta segmentada o no homogénea y (e) viruta discontinua. Fuente: Según M. C. Shaw, P. K. Wright y S. Kalpakjian.

como se aprecia en las virutas mostradas en las figuras 21.3 y 21.5, ocasionado por el mecanismo de corte ilustrado en la figura 21.4a.

Virutas continuas. Las *virutas continuas* por lo general se forman con materiales dúctiles, maquinados a altas velocidades de corte y/o a grandes ángulos de ataque (vea la figura 21.5a). La deformación del material tiene lugar a lo largo de una zona de corte angosta, llamada *zona primaria de cizallamiento*. Las virutas continuas pueden desarrollar una *zona secundaria de cizallamiento* (vea la figura 21.5b) debido a la gran fricción en la interfase herramienta-viruta. Esta zona se hace más gruesa a medida que aumenta la fricción.

La deformación en virutas continuas también tiene lugar a lo largo de una amplia zona primaria de corte con *fronteras curvadas* (vea la figura 21.3b), a diferencia de la observada en la figura 21.5a. Note que en la figura 21.3b la frontera inferior de la zona de deformación se proyecta *por debajo* de la superficie maquinada y la mantiene en distorsión, como lo ilustran las líneas verticales distorsionadas en la subsuperficie maquinada. Esta situación ocurre generalmente al maquinar metales suaves a velocidades bajas y ángulos de ataque pequeños. A menudo resulta en un mal acabado superficial y en esfuerzos residuales superficiales que pueden ir en detrimento de las propiedades de la pieza maquinada con respecto a su vida útil.

Aunque por lo general producen un buen acabado superficial, las virutas continuas no son necesariamente deseables ya que tienden a enredarse alrededor del soporte de la herramienta, de los accesorios y de la pieza de trabajo. También interfieren con los sistemas de eliminación de virutas que se describen en la sección 23.3.7. Este problema puede disminuirse con **rompevirutas** (vea la figura 21.7), mediante el cambio de los parámetros de procesamiento como la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte, o con el empleo de fluidos de corte.

Virutas de borde acumulado. Un *borde acumulado* (BUE, por sus siglas en inglés) se forma con capas de material de la pieza de trabajo que se depositan gradualmente en el extremo de la herramienta, de ahí el término *acumulado* (vea la figura 21.5c). Conforme se hace más grande, el BUE se vuelve inestable y eventualmente se rompe. Una parte del material del BUE se acarrea por el lado de la herramienta de la viruta, el resto se deposita al azar en la superficie de la pieza de trabajo. De hecho, un borde acumulado cambia la geometría del filo de corte y lo mella, como se ve en la figura 21.6a. El ciclo de formación y destrucción de bordes acumulados se repite continuamente durante la operación de corte.

El borde acumulado es un factor importante que afecta adversamente el acabado de la superficie, como puede verse en las figuras 21.5c y 21.6b y c. Por otro lado, en general, se considera deseable un BUE delgado, estable, ya que reduce el desgaste de la herramienta gracias a que protege su superficie de ataque o cara de incidencia. Los metales trabajados en frío tienen por lo general menos tendencia a formar borde acumulado que aquellos ubicados en la condición de recocido. Debido al endurecimiento por trabajo y a la deposición de capas sucesivas de material, la dureza de los bordes acumulados se incrementa de manera significativa (vea la figura 21.6a).

La tendencia a la formación de BUE se puede reducir con una o varias de las siguientes medidas:

- Incrementar la velocidad de corte.
- Disminuir la profundidad de corte.
- Aumentar el ángulo de ataque.
- Usar una herramienta de corte que tenga menor afinidad química con el material de la pieza de trabajo o emplear una herramienta afilada.
- Usar un fluido de corte eficaz.

Virutas escalonadas. Las *virutas escalonadas*, también conocidas como *segmentadas* o *no homogéneas* (vea la figura 21.5d), son virutas semicontinuas con grandes zonas de deformación cortante baja y pequeñas áreas de gran **esfuerzo** cortante, por lo que estas

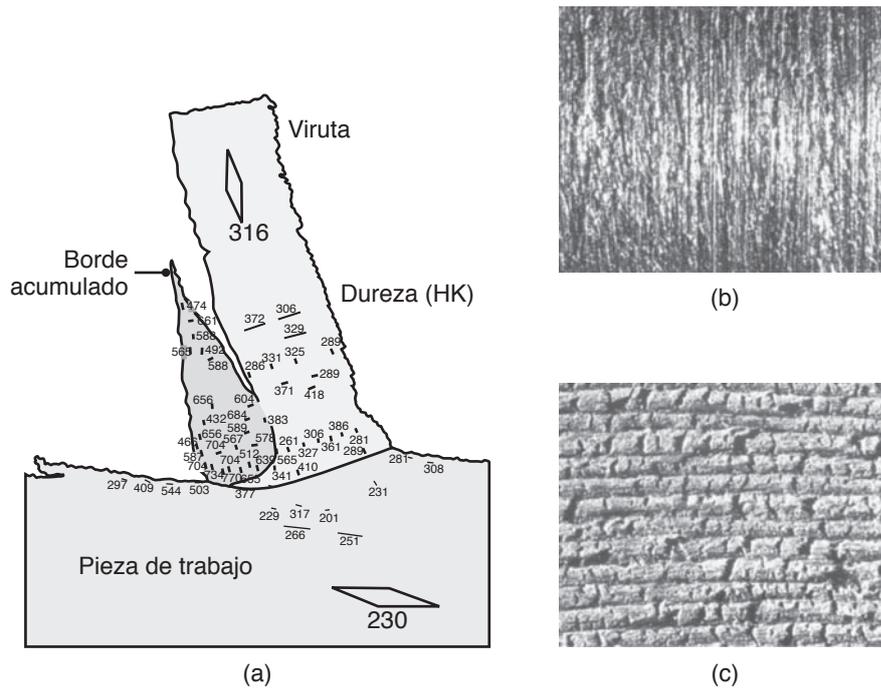


FIGURA 21.6 (a) Distribución de la dureza en el borde acumulado en la zona de corte (material: acero 3115); observe que ciertas regiones en el borde generado son hasta tres veces más duras que el metal bruto de la pieza de trabajo. (b) Acabado superficial producido al torneado acero 5130 con un borde acumulado. (c) Acabado superficial en acero 1018 al fresar una cara. Ampliación: 15 \times . Fuente: Cortesía de Metcut Research Associates, Inc.

últimas se llaman *localizaciones de cortante*. Las virutas tienen aspecto de dientes de sierra. (Este tipo de viruta no debe confundirse con el que se ilustra en la figura 21.4a, donde la dimensión d se ha exagerado mucho). Los metales que tienen baja conductividad térmica y una resistencia que disminuye abruptamente con la temperatura (lo que se llama *ablandamiento térmico*) tienen este comportamiento, el cual es más notable en el titanio y sus aleaciones.

Virutas discontinuas. Las *virutas discontinuas* consisten en segmentos agrupados entre sí con firmeza u holgadamente (vea la figura 21.5e). Por lo general, las virutas discontinuas se forman en las condiciones siguientes:

- Materiales frágiles de la pieza de trabajo debido a que no tienen la capacidad de soportar las grandes deformaciones cortantes encontradas en el maquinado.
- Materiales de la pieza de trabajo que contienen inclusiones e impurezas duras o tienen estructuras como las hojuelas de grafito en el hierro fundido gris (vea la figura 4.13a).
- Velocidad de corte, V , muy baja o muy alta.
- Gran profundidad de corte, d .
- Ángulo de ataque bajo, α .
- Falta de un fluido de corte eficaz (vea la sección 22.12).
- Baja rigidez del soporte de la herramienta o de la máquina herramienta, lo cual permite que ocurran vibraciones y traqueteos (vea la sección 25.4).

Debido a la naturaleza discontinua de la formación de virutas, las fuerzas de corte varían en forma continua durante el maquinado. En consecuencia, la rigidez del soporte de la herramienta de corte, los dispositivos que sujetan la pieza de trabajo y la máquina herramienta (capítulos 23 a 25) son factores significativos en el maquinado con virutas

escalonadas o discontinuas. Si la máquina herramienta no es lo suficientemente rígida, puede comenzar a vibrar y traquetear, como se estudia con detalle en la sección 25.4. A su vez, esto afecta adversamente el acabado superficial y la precisión dimensional de la parte maquinada, además puede causar un desgaste prematuro o daño a la herramienta de corte. Incluso los componentes de la máquina herramienta pueden verse dañados si la vibración es excesiva.

Viruta en forma de rizos. En todas las operaciones de corte de metales, así como en materiales no metálicos, las virutas desarrollan una curvatura (*viruta en forma de rizos*) a medida que salen de la superficie de la pieza de trabajo (vea la figura 21.5). Entre los factores que propician la generación de virutas en forma de rizos están los siguientes:

- La distribución de los esfuerzos en las zonas primaria y secundaria de corte.
- Efectos térmicos en la zona de corte.
- Características de endurecimiento por deformación del material de la pieza de trabajo.
- Geometría de la herramienta de corte.
- Variables de procesamiento.
- Fluidos de corte.

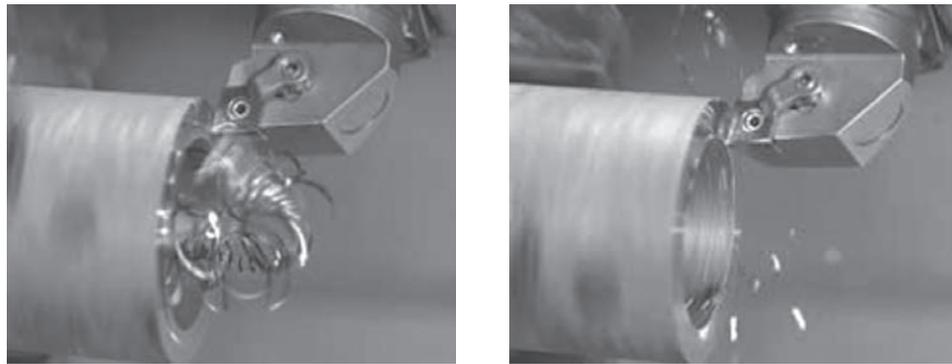
Los primeros cuatro conceptos mencionados son fenómenos complejos y quedan fuera del alcance de este libro. En cuanto a los efectos de las variables de procesamiento, conforme la profundidad de corte disminuye, el radio de curvatura de la viruta generalmente disminuye (la viruta genera rizos con mayor curvatura). Los fluidos de corte pueden hacer que las virutas se ricen más, lo que reduce el área de contacto entre la herramienta y la viruta (vea la figura 21.7a) y así el calor se concentra más cerca del extremo de la herramienta (vea la sección 21.4); como resultado, aumenta el desgaste de la herramienta.

Rompevirutas. Como ya se mencionara, las virutas continuas y largas son indeseables en las operaciones de maquinado porque tienden a enredarse, interfieren severamente con las operaciones de maquinado y son un riesgo potencial de seguridad. Si todas las variables de procesamiento están bajo control, el procedimiento usual empleado para evitar dichas situaciones consiste en romper las virutas en forma intermitente con herramientas de corte cuya forma de *rompevirutas* es característica, como se aprecia en la figura 21.7.

El principio básico de un rompevirutas instalado en la superficie de ataque de una herramienta es doblar y romper la viruta periódicamente. Las herramientas y los insertos de corte actuales (vea la figura 22.2) incluyen diversos diseños característicos para romper virutas (vea la figura 21.7). Las virutas también se pueden romper con el cambio de la geometría de la herramienta para controlar el flujo de la viruta, como en las operaciones de torneado que se muestran en la figura 21.8. La experiencia indica que el tamaño ideal para romper una viruta es cuando adquiere la forma de la letra C o del número 9 y está dentro de un cuadrado de 25 mm (1 pulgada).

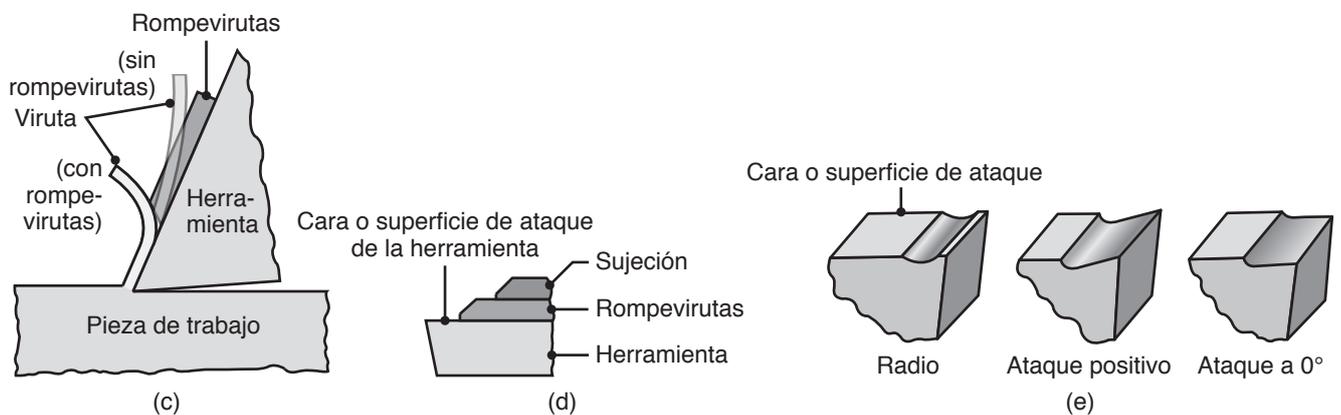
Contacto controlado en las herramientas. Las herramientas de corte se pueden diseñar de modo que la longitud del contacto herramienta-viruta se reduzca al hacer un hueco en la cara de incidencia o superficie de ataque de la herramienta a cierta distancia de su extremo. Esta reducción de la longitud de contacto afecta la mecánica de formación de virutas. En primer lugar, reduce las fuerzas de corte y con ello la energía y la temperatura. Es importante la determinación de la longitud óptima ya que una longitud de contacto mucho menor concentraría el calor en el extremo de la herramienta, lo que aumentaría su desgaste.

Materiales de corte no metálicos. Entre los termoplásticos de corte se encuentra toda una variedad de virutas (vea la sección 7.3), lo que depende del tipo de polímero y de parámetros de procesamiento como la profundidad de corte, la geometría de la herramienta y la velocidad de corte. Los análisis sobre metales también son aplicables en general a los polímeros. Debido a que son frágiles, los polímeros termofijos (vea la sección 7.4) y los materiales cerámicos (capítulo 8) generalmente producen virutas discontinuas. Las características de otros materiales maquinados se describen en la sección 21.7.3.



(a)

(b)

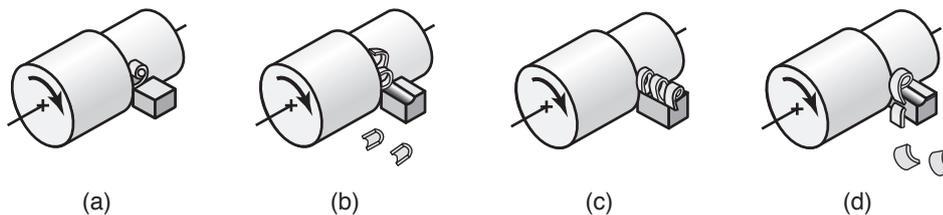


(c)

(d)

(e)

FIGURA 21.7 (a) Maquinado de aluminio con el uso de un inserto sin rompevirutas; observe que las virutas largas pueden interferir con la herramienta y son un riesgo para la seguridad. (b) Maquinado de aluminio con rompevirutas. (c) Ilustración esquemática de la acción de un rompevirutas; observe que el rompevirutas disminuye el radio de curvatura de la viruta y termina por romperlo. (d) Rompevirutas sujeto con abrazaderas a la superficie de ataque de una herramienta de corte. (e) Muestras en las herramientas de corte que actúan como rompevirutas. La mayoría de las herramientas de corte que se usan ahora son insertos que incorporan las características de los rompevirutas. Fuente: (a) y (b) Cortesía de Kennametal Inc.



(a)

(b)

(c)

(d)

FIGURA 21.8 Virutas producidas al torneado: (a) viruta muy rizada; (b) la viruta golpea la pieza de trabajo y se rompe; (c) viruta continua que se aparta radialmente de la pieza de trabajo y (d) la viruta golpea el soporte de la herramienta y se rompe.

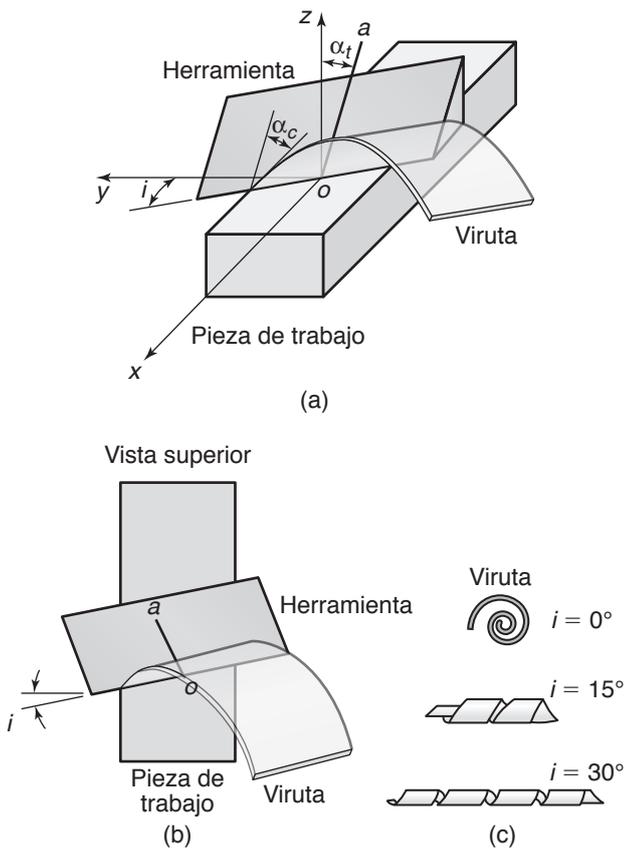


FIGURA 21.9 (a) Ilustración esquemática del corte con una herramienta oblicua; observe la dirección del movimiento de la viruta. (b) Vista superior; se aprecia el ángulo de inclinación, i . (c) Tipos de viruta producidos con herramientas conforme aumentan los valores de los ángulos de inclinación.

21.2.2 Corte oblicuo

La mayoría de las operaciones de maquinado involucran formas de herramientas que son tridimensionales, con las que el corte es *oblicuo*. La diferencia básica entre los cortes oblicuo y ortogonal se muestra en las figuras 21.9a y c. En el corte ortogonal la viruta se desliza directamente hacia arriba de la cara de la herramienta y se torna espiral, mientras que en el *corte oblicuo* la viruta es helicoidal y deja la superficie de la pieza de trabajo con un ángulo i , llamado **ángulo de inclinación** (vea la figura 21.9b). Observe que la dirección lateral del movimiento de la viruta en el corte oblicuo es similar a la acción de la hoja de una máquina quitanieves, con la que la nieve es lanzada hacia los lados.

En la figura 21.9a, observe que las virutas fluyen hacia arriba de la superficie de ataque con un ángulo α_c (llamado **ángulo de flujo de la viruta**) que se mide con respecto al plano de la cara de la herramienta. El ángulo α_t es el **ángulo de ataque normal** y es una propiedad geométrica básica de la herramienta; este ángulo es el que se ubica entre la línea oz perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo y la línea oa sobre la superficie de ataque de la herramienta en la figura.

En el corte oblicuo, el material de la pieza de trabajo se aproxima a la herramienta de corte a una velocidad V y deja la superficie (como viruta) a una velocidad V_c . El **ángulo de ataque efectivo**, α_e , se calcula en el plano de estas dos velocidades. Suponiendo que el ángulo de flujo, α_c , es igual al ángulo de inclinación, i (suposición que se ha verificado experimentalmente), el ángulo de ataque efectivo, α_e , es

$$\alpha_e = \text{sen}^{-1}(\text{sen}^2 i + \text{cos}^2 i \text{sen} \alpha_n). \quad (21.9)$$

Ya que tanto i como α_n pueden ser medidos directamente, entonces puede calcularse el ángulo de ataque efectivo. Observe que, conforme se incrementa i , aumenta el ángulo de ataque efectivo, la viruta se hace más delgada y larga y, en consecuencia, disminuye la fuerza de corte. La influencia del ángulo de inclinación en la forma de la viruta se muestra en la figura 21.9c.

En la figura 21.10a se muestra una herramienta de torneado, buril, de un solo punto o monofilo. Note los distintos ángulos involucrados, cada uno de los cuales tiene que seleccionarse apropiadamente para lograr un corte eficiente. Aunque estos ángulos se han producido tradicionalmente por medio de rectificación (o esmerilado) (vea el capítulo 26), la mayoría de las herramientas de corte ya están disponibles en forma de insertos, como se aprecia en la figura 21.10b y se describe con detalle en el capítulo 22. En los capítulos 23 y 24 se describen con mucho detalle distintas herramientas de corte tridimensionales incluyendo las utilizadas para taladrar, machuelear, fresar, cepillar, tallar, brochar, aserrar y limar.

Rasurado y pelado. Es posible remover capas delgadas de material de superficies rectas o curvadas por medio de un proceso similar al uso de un cepillo para rasurar madera. El *rasurado* es particularmente útil para mejorar el acabado superficial y la precisión dimensional de los tejos obtenidos después de la operación de troquelado y cizallado, como se muestra en la figura 16.9. Otra aplicación común del rasurado ocurre en el acabado de engranes, donde se usa un cortador que tiene la forma de los dientes del engrane (vea la sección 24.7). Las piezas largas o que tienen formas complejas se cepillan por medio del pelado con una herramienta de corte de forma especial que se desplaza tangencialmente a través de la longitud de la pieza de trabajo.

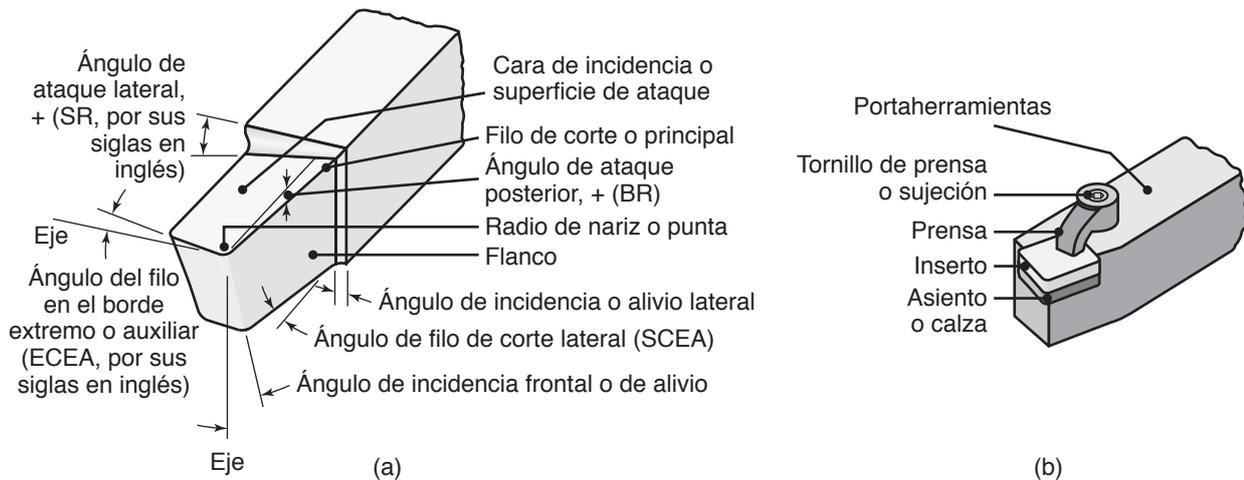


FIGURA 21.10 (a) Ilustración esquemática de una herramienta de corte de derecha. En la sección 23.2 se describen los distintos ángulos empleados en estas herramientas y sus efectos en el maquinado. Aunque tradicionalmente estas herramientas se han producido a partir de barras sólidas de acero, ya han sido reemplazadas en gran parte con (b) insertos hechos de carburos y otros materiales en diversos tamaños y formas.

21.3 Fuerzas y potencia en el proceso de corte

Estudiar las *fuerzas* y la *potencia de corte* involucradas en las operaciones de maquinado es importante por las siguientes razones:

- Los datos sobre las fuerzas de corte son esenciales para que:
 - a. Las máquinas herramientas se puedan diseñar en forma apropiada para minimizar la distorsión de los componentes de máquina, mantener la tolerancia dimensional deseada de la parte maquinada y ayudar a seleccionar los sujetadores o portaherramientas apropiados de la herramienta y los soportes de las piezas.
 - b. La pieza de trabajo sea capaz de resistir dichas fuerzas sin sufrir distorsión excesiva.
- Se deben conocer los requerimientos de potencia con el fin de permitir la selección de una máquina herramienta cuya potencia eléctrica sea la adecuada.

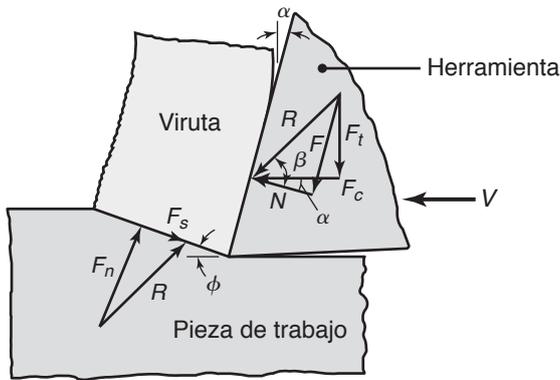
Las fuerzas que actúan en el corte ortogonal se ilustran en la figura 21.11a. La **fuerza de corte**, F_c , actúa en dirección de la velocidad de corte, V , y suministra la energía requerida para cortar. La razón de la fuerza de corte al área de la sección transversal que se corta (es decir, el producto del ancho del corte por la profundidad de éste) se denomina *fuerza de corte específica*.

La **fuerza de empuje**, F_f , actúa en dirección normal a la fuerza de corte. Estas dos fuerzas producen la **fuerza resultante**, R , como puede verse en el diagrama del círculo de fuerzas que se presenta en la figura 21.11b. Note que la fuerza resultante se puede resolver en dos componentes que se presentan sobre la cara de la herramienta: una **fuerza de fricción**, F , a lo largo de la interfase herramienta-viruta y una **fuerza normal**, N , perpendicular a esta fuerza de fricción. También se puede demostrar que

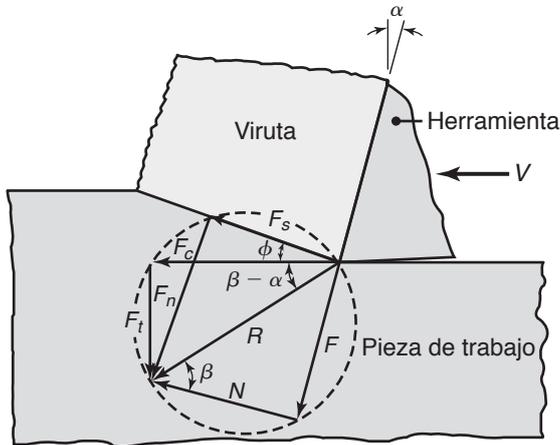
$$F = R \sin \beta \quad (21.10)$$

y que

$$N = R \cos \beta. \quad (21.11)$$



(a)



(b)

Figura 21.11 (a) Fuerzas que actúan en la zona de corte en el momento de generar dos cortes bidimensionales; observe que la fuerza resultante, R , debe ser colineal para balancear las fuerzas. (b) Círculo de fuerzas para determinar las distintas fuerzas que actúan en la zona de corte.

Note que la fuerza resultante es balanceada por una fuerza igual y opuesta a lo largo del plano cortante y que se resuelve en una **fuerza cortante** o de cizallado, F_s , y una **fuerza normal**, F_n . Estas fuerzas pueden expresarse, respectivamente, como

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad (21.12)$$

y

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi. \quad (21.13)$$

Debido a que el área del plano de cizallamiento se puede calcular cuando se conoce el ángulo cortante y la profundidad de corte, es posible determinar tanto el esfuerzo normal como el cortante en el plano de cizallamiento.

La relación de F a N es el **coeficiente de fricción**, μ , presente en la interfase herramienta-*viruta* y el ángulo β es el **ángulo de fricción** (tal como aparecen en la figura 21.11). La magnitud de μ se puede determinar de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha}. \quad (21.14)$$

Aunque en las operaciones reales de corte la magnitud de las fuerzas es, por lo general, del orden de algunos cientos de Newtons, en la zona de corte los *esfuerzos locales* y la *presión* sobre la herramienta de corte son muy altos debido a que las superficies de contacto son muy pequeñas. Por ejemplo, la longitud del contacto herramienta-*viruta* (vea la figura 21.3) comúnmente es del orden de 1 mm (0.04 pulg); en consecuencia, el extremo de la herramienta está expuesto a grandes esfuerzos que llevan al desgaste y al astillado y fractura de la herramienta.

Fuerza de empuje. En el corte, la *fuerza de empuje* es importante ya que el portaherramientas, los dispositivos de sujeción de la pieza y la máquina herramienta en sí deben ser lo suficientemente rígidos como para soportar dicha fuerza con el mínimo de deflexiones. Por ejemplo, si la fuerza de empuje es demasiado grande o si la máquina herramienta no es lo suficientemente rígida, la herramienta será empujada fuera de la superficie de la pieza de trabajo que se maquina. A su vez, este movimiento reduce la profundidad de corte, lo que da como resultado una baja precisión dimensional de la parte maquinada.

El efecto del ángulo de ataque y del ángulo de fricción sobre la magnitud y dirección de la fuerza de empuje se puede determinar si se considera, a partir de la figura 21.11b, que

$$F_t = R \sin(\beta - \alpha), \quad (21.15)$$

o que

$$F_t = F_c \tan(\beta - \alpha). \quad (21.16)$$

La magnitud de la fuerza de corte, F_c , siempre es positiva, como se aprecia en la figura 21.11, debido a que esta fuerza es la que suministra el trabajo requerido para cortar. Sin embargo, el signo de la fuerza de empuje, F_t , puede ser positivo o negativo, esto depende de las magnitudes relativas de β y α . Considere que cuando $\beta > \alpha$, el signo de F_t es positivo (*hacia abajo*) y que cuando $\beta < \alpha$, el signo es negativo (*hacia arriba*). Así, es posible tener una fuerza de empuje dirigida hacia arriba en las condiciones de (a) ángulos de ataque grandes, (b) poca fricción en la interfase herramienta-*viruta* o (c) en ambos casos. Una fuerza de empuje negativa puede tener implicaciones importantes en el diseño de máquinas herramientas, en los elementos de sujeción de la pieza y en la estabilidad del proceso de corte.

Potencia. A partir de la figura 21.11 puede verse que la entrada de potencia en el corte es

$$\text{Potencia} = F_c V. \quad (21.17)$$

Esta potencia se disipa sobre todo en la zona de cizallamiento (debido a la energía requerida para cizallar el material) y en la superficie de ataque de la herramienta (debido a la fricción en la interfase herramienta-viruta).

A partir de las figuras 21.4b y 21.11, la potencia disipada en el plano de cizallamiento es

$$\text{Potencia para el cizallamiento} = F_s V_s. \quad (21.18)$$

Si denotamos el ancho del corte como w , la **energía específica de cizallamiento**, u_s , está dada por

$$u_s = \frac{F_s V_s}{w t_o V}. \quad (21.19)$$

De manera similar, la potencia disipada en la fricción es

$$\text{Potencia para la fricción} = F_r V_c, \quad (21.20)$$

y la **energía específica para la fricción**, u_f , es

$$u_f = \frac{F_r V_c}{w t_o V} = \frac{F_r}{w t_o}. \quad (21.21)$$

La **energía específica total**, u_t , es entonces

$$u_t = u_s + u_f. \quad (21.22)$$

Debido a los numerosos factores involucrados, la predicción confiable de las fuerzas y la potencia que actúan en el corte se basa en gran medida en datos experimentales, como los que se dan en la tabla 21.2. El rango tan amplio de valores que se observan en la tabla se puede atribuir a las diferencias en la resistencia que existe dentro de cada grupo de materiales y a diferentes factores adicionales, como la fricción, el uso de fluidos de corte y una gran variedad de variables de procesamiento. El filo de la punta de la herramienta influye también en las fuerzas y la potencia; dado que la punta roza contra la superficie maquinada y hace que la zona de deformación en la herramienta sea mayor, las herramientas melladas requieren de fuerzas y potencia mayores.

Medición de fuerzas y potencia en el proceso de corte.

Las fuerzas involucradas en el proceso de corte se pueden medir utilizando un **transductor de fuerza** (es común usarlo con sensores piezoeléctricos de cuarzo), un **dinamómetro**, o **celda de carga** (con galgas extensométricas colocadas en anillos octagonales) cementada sobre el portaherramientas. Los transductores tienen una frecuencia natural y rigidez mucho más elevada que los dinamómetros, los cuales tienden a presentar deflexión y vibración excesivas. También es posible calcular la fuerza de corte a partir del **consumo de energía** registrado durante el proceso de corte por medio de la ecuación (21.4).

Se debe reconocer que la ecuación (21.4) representa la potencia en el proceso de maquinado y que la máquina herramienta requerirá más potencia con el fin de vencer la fricción. Entonces, para obtener la fuerza de corte a partir del consumo medido de potencia de la máquina, debe conocerse la eficiencia mecánica de ésta. La **energía específica** en el corte, como la que se aprecia en la tabla 21.2, también puede ser usada para estimar las fuerzas presentes en el corte.

TABLA 21.2

Rango aproximado de requerimientos de energía durante las operaciones de corte en el motor impulsor de la máquina herramienta (para herramientas melladas hay que multiplicar por 1.25)

Material	Energía específica	
	W-s/mm ³	hp-min/pulg ³
Aleaciones de aluminio	0.4-1	0.15-0.4
Hierros fundidos	1.1-5.4	0.4-2
Aleaciones de cobre	1.4-3.2	0.5-1.2
Aleaciones de alta temperatura	3.2-8	1.2-3
Aleaciones de magnesio	0.3-0.6	0.1-0.2
Aleaciones de níquel	4.8-6.7	1.8-2.5
Aleaciones refractarias	3-9	1.1-3.5
Aceros inoxidables	2-5	0.8-1.9
Aceros	2-9	0.7-3.4
Aleaciones de titanio	2-5	0.7-2

EJEMPLO 21.1 Energías relativas en el corte

Dado: En una operación de corte ortogonal, $t_o = 0.005$ pulg, $V = 400$ pies/min, $\alpha = 10^\circ$ y el ancho del corte es de 0.25 pulg. Se observa que $t_c = 0.009$ pulg, $F_c = 125$ lb y $F_t = 50$ lb.

Se solicita: Calcular el porcentaje de la energía total necesaria para vencer la fricción en la interfase herramienta-viruta.

Respuesta: El porcentaje de la energía se puede expresar como,

$$\frac{\text{Energía de fricción}}{\text{Energía total}} = \frac{FV_c}{F_cV} = \frac{Fr}{F_c}$$

donde

$$r = \frac{t_o}{t_c} = \frac{5}{9} = 0.555,$$

$$F = R \text{ sen } \beta,$$

$$F_c = R \text{ cos}(\beta - \alpha),$$

y

$$R = \sqrt{F_t^2 + F_c^2} = \sqrt{50^2 + 125^2} = 135 \text{ lb.}$$

Entonces,

$$125 = 135 \text{ cos}(\beta - 10^\circ),$$

y $\beta = 32^\circ$ y

$$F = 135 \text{ sen } 32^\circ = 71.5 \text{ lb.}$$

Entonces,

$$\text{Porcentaje} = \frac{(71.5)(0.555)}{125} = 32,$$

o 32 por ciento.

21.4 Temperaturas durante el proceso de corte

Como en todos los procesos de trabajo de metales en los que está involucrada la deformación plástica (capítulos 13 a 16), la energía disipada en el corte se convierte en *calor* el cual, a su vez, aumenta la temperatura en la zona de corte y la superficie de la pieza de trabajo. El *aumento de temperatura* es un factor muy importante en el maquinado a causa de sus grandes efectos adversos:

- La temperatura excesiva disminuye la resistencia, dureza, rigidez y resistencia al desgaste de la herramienta de corte; las herramientas también se suavizan y sufren deformación plástica, lo que altera su forma.
- El aumento de calor ocasiona cambios dimensionales irregulares en la parte maquinada, dependiendo de las propiedades físicas del material (capítulo 3), esto hace que sea difícil controlar la precisión y las tolerancias dimensionales.
- Un aumento excesivo de la temperatura puede inducir daño térmico y cambios metalúrgicos (capítulo 4) en la superficie maquinada, lo que afecta adversamente sus propiedades.

Durante el maquinado, las fuentes principales de calor son: (a) el trabajo realizado al cortar en la zona primaria de corte, (b) la energía disipada como fricción en la interfase herramienta-viruta y (c) el calor generado conforme la herramienta roza contra la superficie maquinada, en especial con herramientas melladas o desgastadas. Se ha dedicado mucho esfuerzo al establecimiento de relaciones entre la temperatura y diferentes materiales y variables que intervienen durante el proceso de corte. Es posible demostrar que en el *corte ortogonal*, la *temperatura media*, T_{media} , en °F, es:

$$T_{media} = \frac{1.2Y_f}{\rho c} \sqrt[3]{\frac{Vt_o}{K}}, \tag{21.23}$$



Código QR 21.3 Medición de temperaturas durante el corte de metal. (Fuente: Cortesía del National Institute of Standards and Technology).

donde Y_f es el esfuerzo de fluencia en psi, ρ_c es el calor específico volumétrico en pulg-lb/pulg³ °F y K es la difusividad térmica (relación de la conductividad térmica al calor volumétrico específico) en pulg²/s. Debido a que en esta ecuación los parámetros del material también dependen de la temperatura, es importante usar los valores apropiados compatibles con el rango de temperatura pronosticado. A partir de la ecuación (21.23), se puede ver que la temperatura media de corte se incrementa con la resistencia de la pieza de trabajo, la velocidad de corte y la profundidad de corte y que disminuye con el aumento del calor específico y la conductividad térmica del material de la pieza de trabajo.

Una expresión simple para la *temperatura media durante el cilindrado* en un torno está dada por

$$T_{\text{media}} \propto V^a f^b, \quad (21.24)$$

donde V es la velocidad de corte y f es el avance de la herramienta, como se aprecia en la figura 21.2. Los valores aproximados de los exponentes a y b son $a = 0.2$ y $b = 0.125$, para herramientas de *carburo*, y $a = 0.5$ y $b = 0.375$ para herramientas de *acero de alta velocidad*.

Distribución de la temperatura. Debido a que en el maquinado las fuentes de generación de calor se concentran en la zona primaria de corte y en la interfase herramienta-viruta, es de esperarse que en la zona de corte haya severos gradientes de temperatura. En la figura 21.12 tenemos una distribución típica de temperatura; observe usted la presencia de marcados gradientes y que la temperatura máxima ocurre en la mitad superior de la interfase herramienta-viruta.

En la figura 21.13, las temperaturas que se muestran fueron desarrolladas en una operación de *torneado* en acero 52100. En la figura 21.13a se muestran las distribuciones de temperatura a lo largo de la *superficie del flanco*, para $V = 60, 90$ y 170 m/min, como una función de la distancia que hay a la punta de la herramienta. En la figura 21.13b se presentan las distribuciones de temperatura en la *interfase herramienta-viruta*, para las mismas tres velocidades de corte, como una función de la fracción de la longitud de contacto. Entonces, el cero sobre la abscisa representa la punta de la herramienta y 1.0 representa el extremo de la longitud del contacto herramienta-viruta.

Note que en la ecuación (21.23), la temperatura aumenta con la velocidad de corte y la temperatura más elevada es de casi 1100 °C (2000 °F). La presencia de temperaturas tan altas en el maquinado se puede verificar con sólo observar el color azul oscuro de las virutas (causado por oxidación), el cual es producido comúnmente a velocidades de corte elevadas. Las virutas pueden incluso llegar a ser de color rojo, lo que constituye un riesgo para la seguridad del operador.

A partir de la ecuación (21.24) y los valores del exponente a , se puede ver que la velocidad de corte, V , influye mucho en la temperatura. La explicación es que a medida que la velocidad se incrementa, disminuye el tiempo necesario para la disipación del calor, con lo que la temperatura sube y, a fin de cuentas, el proceso se convierte casi en *adiabático*. Este efecto que tiene la velocidad se puede simular con mucha facilidad al frotarnos las manos cada vez más rápido.

Como puede verse en la figura 21.14, la viruta elimina la mayor parte del calor generado. Se estima que en una operación común de maquinado, 90% de la energía es eliminada por la viruta y el resto se transmite a la herramienta y a la pieza de trabajo. En dicha figura, note que conforme aumenta la velocidad de corte, una proporción mayor del calor total generado es eliminada por la viruta y menos calor va hacia otra parte. Ésta es una razón para que siempre sea deseable aumentar las velocidades del maquinado (vea *maquinado de alta velocidad* en la sección 25.5). El otro beneficio importante de las velocidades de corte más altas está asociado con la favorable economía que se obtiene al reducir el tiempo de maquinado, como se describe en la sección 25.8.

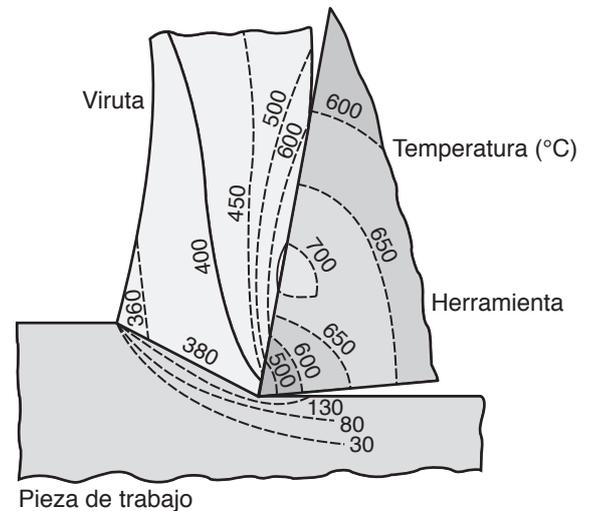


FIGURA 21.12 Distribución típica de la temperatura en la zona de corte; observe la severidad en los gradientes de temperatura entre la herramienta y la viruta y que la pieza de trabajo permanece relativamente fría. Fuente: Según G. Vieregge.

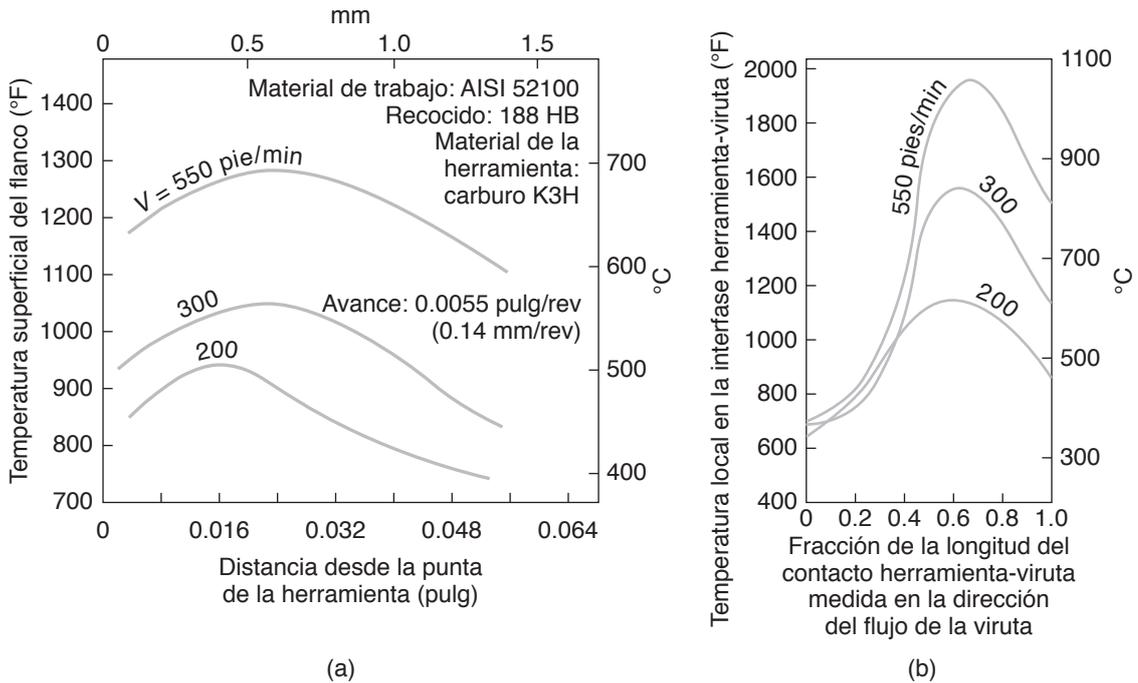


FIGURA 21.13 Temperaturas desarrolladas durante el proceso de torneado en acero 52100: (a) distribución de temperatura en el flanco y (b) distribución de temperatura en la interfase herramienta-viruta. Fuente: Según B. T. Chao y K. J. Trigger.

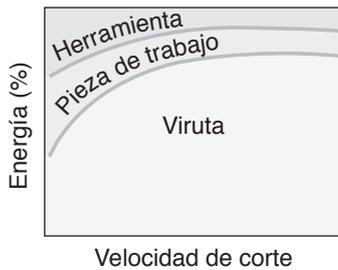


FIGURA 21.14 Proporción del calor generado al cortar que se transfiere a la herramienta, la pieza de trabajo y la viruta como una función de la velocidad de corte; observe que la viruta elimina la mayor parte del calor.

Técnicas de medición de la temperatura. Las temperaturas y su distribución en la zona de corte se pueden determinar por medio de **termopares** embebidos en la herramienta o la pieza de trabajo. Esta técnica se ha empleado con éxito, aunque implica un esfuerzo considerable. Es más fácil determinar la temperatura *media* con la **fem térmica** (fuerza electromotriz; fem, por sus siglas en inglés) en la interfase herramienta-viruta, la cual actúa como *unión caliente* entre dos materiales diferentes (herramienta y viruta). La **radiación infrarroja** de la zona de corte puede observarse también mediante un *pirómetro de radiación*; sin embargo, esta técnica solamente indica las temperaturas superficiales y su exactitud depende de la emisividad de las superficies, la cual es difícil de determinar con precisión.

21.5 Vida de la herramienta: desgaste y falla

En las secciones anteriores se ha demostrado que las herramientas de corte están sujetas a (a) elevadas tensiones localizadas en la punta de la herramienta; (b) altas temperaturas, en especial a lo largo de la superficie de ataque; (c) deslizamiento de la viruta a grandes velocidades a lo largo de la superficie de ataque y (d) deslizamiento de la herramienta a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo maquinada nuevamente. Estas condiciones inducen al **desgaste de la herramienta**, que es una consideración importante en todas las operaciones de maquinado tanto como lo es el desgaste de dados o matrices en los procesos de fundición y conformado de metales. El desgaste de la herramienta afecta adversamente la vida de ésta, la calidad de la superficie maquinada y su precisión dimensional y, en consecuencia, la economía de las operaciones de corte.

El desgaste es un proceso gradual (vea la sección 33.5), muy parecido al desgaste de la punta de un lápiz común. La *velocidad* de desgaste de la herramienta (es decir, el volumen usado por unidad de tiempo) depende del material de la pieza de trabajo, del material

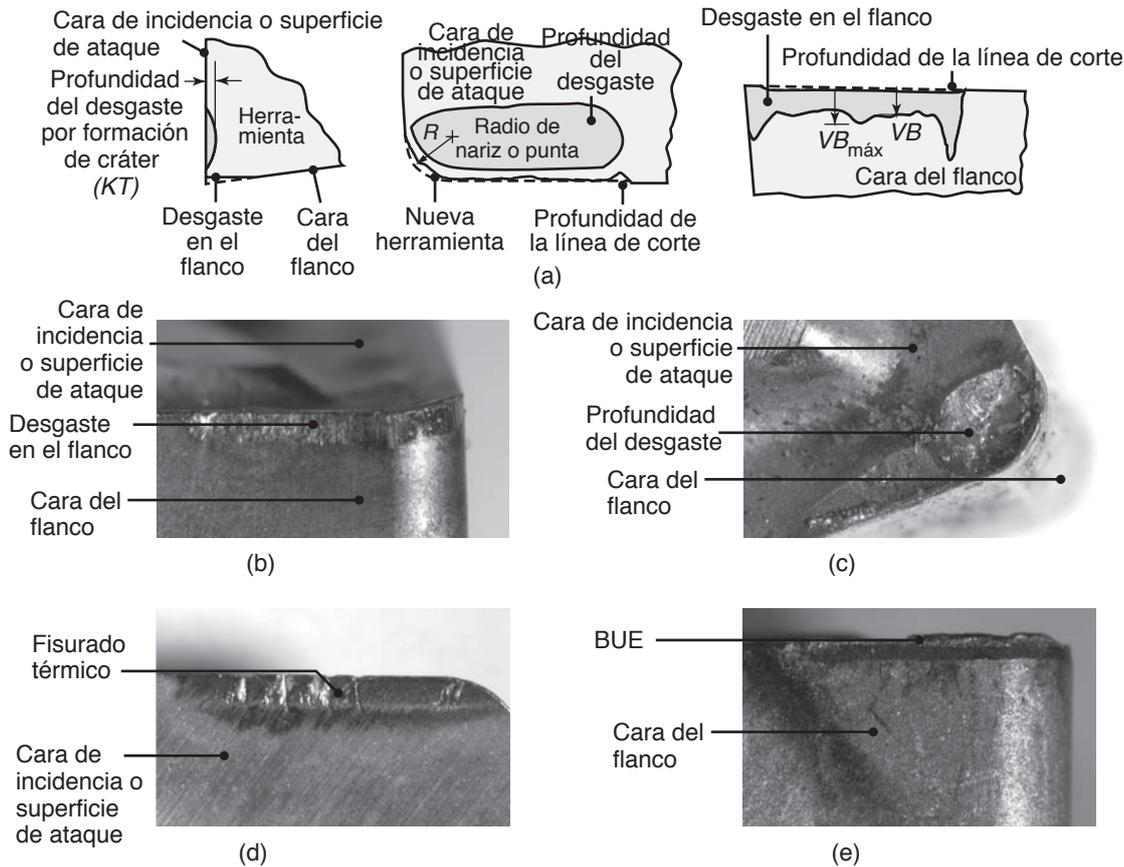


FIGURA 21.15 (a) Características del desgaste de la herramienta en una operación de torneado; con VB se denota el desgaste promedio del flanco. Desde (b) hasta (e) se muestran ejemplos de desgaste en herramientas de corte: (b) desgaste en el flanco, (c) craterización o desgaste por formación de cráter, (d) fisurado térmico y (e) desgaste en el flanco y borde acumulado. *Fuente:* (a) Términos y definiciones reproducidos con permiso de la International Organization for Standardization, ISO, propietaria de los derechos de autor. (b) a (e) Cortesía de Kennametal Inc.

de que estén hechos la herramienta y sus recubrimientos, de la geometría de ésta, de los parámetros del proceso, de los fluidos de corte y de las características de la máquina herramienta. El desgaste de la herramienta y los cambios resultantes en su geometría (vea la figura 21.13) generalmente se clasifican como *desgaste del flanco*, *craterización* o *desgaste por formación de cráter*, *desgaste de nariz*, *muescado*, *deformación plástica*, *astillado* y *fractura mayor*.

21.5.1 Desgaste del flanco

El *desgaste del flanco* ocurre en la cara o superficie de incidencia o alivio (flanco) de la herramienta, como se aprecia en las figuras 21.15a, b y e. Por lo general, se atribuye a (a) fricción de la herramienta a lo largo de la superficie maquinada, lo que ocasiona desgaste adhesivo o abrasivo, y (b) altas temperaturas, lo que afecta adversamente las propiedades del material de la herramienta.

En un estudio clásico realizado por F. W. Taylor (1856-1915) sobre el maquinado de aceros, efectuado a principios de la década de 1890, se estableció la siguiente relación aproximada de la vida de la herramienta, la cual es conocida como *ecuación de Taylor para la vida de la herramienta*:

$$VT^n = C, \quad (21.25)$$

TABLA 21.3
Rangos de n valores para la ecuación de Taylor (21.25) para distintos materiales de la herramienta

Aceros de alta velocidad	0.08-0.2
Aleaciones fundidas	0.1-0.15
Carburos	0.2-0.5
Carburos recubiertos	0.4-0.6
Cerámicos	0.5-0.7

donde V es la velocidad de corte, T es el tiempo (en minutos) que toma desarrollar cierta pista de **desgaste permisible** del flanco (mostrado como VB en la figura 21.15a), n es un exponente que depende de los materiales de la herramienta y de la pieza de trabajo, además de las condiciones de corte, y C es una constante. Cada combinación de materiales de la pieza de trabajo y la herramienta y cada condición de corte tienen sus propios valores para n y C , los cuales se determinan experimentalmente y con frecuencia se basan en los requerimientos de acabado de la superficie. Asimismo, la ecuación de Taylor se aplica con frecuencia aunque el desgaste del flanco no sea el modo de desgaste dominante (vea la figura 21.15), o cuando se usa un criterio diferente (como el empleo de una potencia requerida en maquinado) para definir C y n . Por lo general, n depende del material de la herramienta, como se aprecia en la tabla 21.3, y C del material de la pieza de trabajo. Note que la magnitud de C es la velocidad de corte en $T = 1$ min.

Para apreciar la importancia del exponente n , podemos reescribir la ecuación (21.25) como sigue:

$$T = \left(\frac{C}{V} \right)^{1/n}, \tag{21.26}$$

donde se puede ver que para un valor constante de C , cuanto más pequeño sea el valor de n más corta será la vida de la herramienta.

La variable más importante asociada con la vida de la herramienta es la velocidad de corte, seguida de la profundidad de corte y del avance, f . Para el torneado, la ecuación (21.25) se puede modificar como:

$$VT^n d^x f^y = C, \tag{21.27}$$

donde d es la profundidad de corte y f es el avance en mm/rev o en pulg/rev, como se observa en la figura 21.2. Los exponentes x y y deben determinarse de manera experimental para cada condición de corte.

Al tomar $n = 0.15$, $x = 0.15$ y $y = 0.6$ como los valores típicos que se encuentran en la práctica del maquinado, puede verse que la velocidad de corte, la rapidez de avance y la profundidad de corte tienen menos importancia. La ecuación (21.27) se puede reescribir como sigue:

$$T = C^{1/n} V^{-1/n} d^{-x/n} f^{-y/n}, \tag{21.28}$$

o bien, si se usan los valores típicos para los exponentes, como

$$T \approx C^7 V^{-7} d^{-4} f^{-4}. \tag{21.29}$$

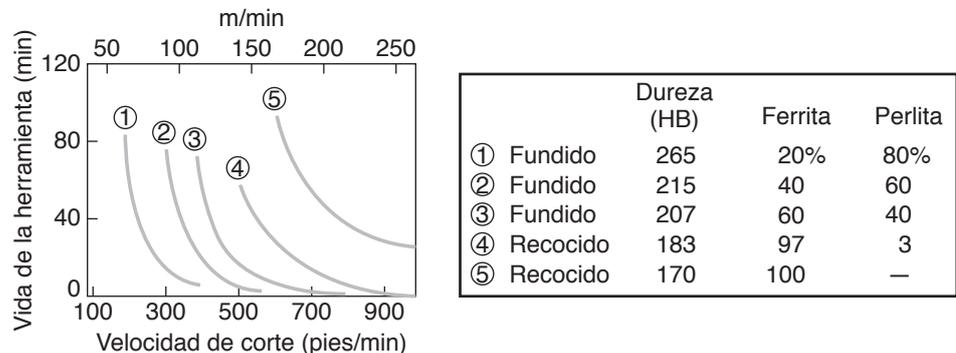


FIGURA 21.16 Efecto de la dureza de la pieza de trabajo y de la microestructura sobre la vida de la herramienta al torneado de hierro fundido dúctil; observe la rápida disminución (que tiende a cero) de la vida de la herramienta conforme aumenta la velocidad de corte. Los materiales para herramienta se han desarrollado para soportar altas temperaturas, como los carburos, cerámicos y el nitruro de boro cúbico, según se describe en el capítulo 22.

Para obtener una constante de la vida de la herramienta se pueden hacer las observaciones siguientes a partir de la ecuación (21.29):

- Si el avance o la profundidad de corte aumentan, debe disminuirse la velocidad de corte, y viceversa.
- En función de los exponentes, la reducción de la velocidad puede dar como resultado un aumento en el volumen del material eliminado, debido al aumento en el avance o en la profundidad de corte.

Curvas de vida de la herramienta. Las *curvas de vida de la herramienta* son gráficas de datos experimentales obtenidos a partir de pruebas de corte para varios materiales y en diferentes condiciones de corte, como la velocidad de corte, el avance, la profundidad de corte, el material y la geometría de la herramienta y los fluidos de corte. En la figura 21.16 note, por ejemplo, que (a) la vida de la herramienta disminuye rápidamente a medida que se incrementa la velocidad de corte, (b) la condición del material de la pieza de trabajo tiene gran influencia en la vida de la herramienta y (c) hay mucha diferencia en la vida de la herramienta para diferentes microestructuras del material de la pieza de trabajo (capítulo 4).

Es importante el tratamiento térmico de la pieza de trabajo, principalmente por el aumento en su dureza. Por ejemplo, la ferrita tiene una dureza de alrededor de 100 HB, la de la perlita es de 200 HB y la de la martensita va de 300 a 500 HB. Impurezas y componentes duros presentes en el material o en la superficie de la pieza de trabajo, tales como herrumbre, escamas y escoria, también son factores importantes debido a que su acción abrasiva reduce la vida de la herramienta.

El exponente n se puede determinar a partir de las curvas de vida de la herramienta (vea la figura 21.17). Observemos que cuanto más pequeño es el valor de n , más rápido disminuye la vida de la herramienta al incrementarse la velocidad de corte. Aunque las curvas de vida de la herramienta son un tanto lineales en un rango limitado de velocidades de corte, rara vez lo son en un rango amplio. Además, el exponente n puede incluso hacerse *negativo* a bajas velocidades de corte, lo cual significa que las curvas de vida de la herramienta en realidad alcanzan un máximo y después bajan. Debido a esta posibilidad, debe tenerse precaución al usar las ecuaciones de vida de la herramienta más allá del rango de velocidades de corte en que son aplicables.

Debido a que la temperatura tiene una gran influencia en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales (vea los capítulos 2 y 3), se espera que también influya mucho en el desgaste. Así, conforme aumenta la temperatura, aumenta el desgaste.

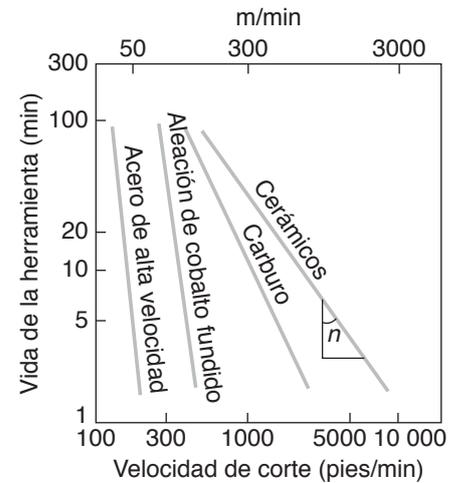


FIGURA 21.17 Curvas de vida de la herramienta para varios materiales de herramientas de corte. El recíproco negativo de la pendiente de estas curvas es el exponente n en la ecuación de Taylor para la vida de la herramienta (21.25), C es la velocidad de corte en $T = 1$ min y varía desde casi 200 hasta 10 000 pies/min en esta figura.

EJEMPLO 21.2 Incremento de la vida de la herramienta mediante la reducción de la velocidad de corte

Dado: Suponga que para cierta combinación de herramienta y pieza de trabajo, $n = 0.5$ y $C = 400$.

Se solicita: Utilizando la ecuación de Taylor para la vida de la herramienta, calcular el porcentaje de aumento en la vida de la herramienta cuando la velocidad de corte se reduce 50 por ciento.

Respuesta: Como $n = 0.5$, la ecuación de Taylor puede escribirse como $VT^{0.5} = 400$. Se denota con V_1 la velocidad inicial y con V_2 la velocidad reducida; así, $V_2 = 0.5V_1$. Debido a que C es una constante igual a 400, tenemos la relación,

$$0.5V_1\sqrt{T_2} = V_1\sqrt{T_1}.$$

Al simplificar esta ecuación,

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{0.25} = 4.$$

Entonces, el cambio en la vida de la herramienta es

$$\frac{T_2 - T_1}{T_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right) - 1 = 4 - 1 = 3$$

es decir, la vida de la herramienta se incrementó en 300%. Observemos que una *reducción* en la velocidad de corte dio como resultado un gran *incremento* en la vida de la herramienta. También tenemos que, para este problema, no es relevante la magnitud de C .

Pista de desgaste permisible. Un cuchillo o unas tijeras tienen que afilarse cuando se deteriora la calidad de su corte o las fuerzas requeridas para operarlos son demasiado grandes. De igual manera, las herramientas de corte necesitan afilarse o sustituirse cuando (a) el acabado de la superficie de la pieza maquinada se comienza a deteriorar; (b) las fuerzas de corte se incrementan de manera significativa, o (c) la temperatura sube significativamente. En la tabla 21.4 se proporciona la *pista de desgaste permisible*, denotada con *VB* en la figura 21.15a, para distintas condiciones de maquinado. Para mejorar la precisión dimensional y el acabado superficial, la pista de desgaste permisible debe ser más pequeña que los valores dados en la tabla. La *velocidad de corte recomendada* para una herramienta de acero de alta velocidad (vea la sección 22.2), por lo general, es aquella que produce una vida para la herramienta de 60 a 120 minutos y, para una herramienta de carburo (sección 22.4), una vida de 30 a 60 minutos.

Velocidad de corte óptima. Recordemos que conforme se aumenta la velocidad de corte, la vida de la herramienta se reduce rápidamente. Por otro lado, si la velocidad de corte es baja, la vida de la herramienta es larga, pero la velocidad de remoción de material también es baja. Entonces, existe una *velocidad de corte óptima* basada en consideraciones económicas o de producción en la que la vida de la herramienta es larga y las velocidades de producción son razonablemente altas. Debido a que involucra varios parámetros adicionales, este tema se describe con más amplitud en la sección 25.8.

EJEMPLO 21.3 Efecto de la velocidad de corte en la remoción de material

El efecto de la velocidad de corte en el volumen de metal removido entre los cambios de herramienta (o su afilado) se aprecia mediante el análisis de la figura 21.16. Supongamos que un material se maquina en una condición de fundición y que tiene una dureza de 265 HB. Note que cuando la velocidad de corte es de 60 m/min, la vida de la herramienta es de cerca de 40 minutos. Por lo tanto, la herramienta recorre una distancia de $60 \text{ m/min} \times 40 \text{ min} = 2400 \text{ m}$ antes de que deba ser sustituida. Sin embargo, cuando la velocidad de corte aumenta a 120 m/min, la vida de la herramienta se re-

duce a cerca de 5 minutos y, por ello, recorre $120 \text{ m/min} \times 5 \text{ min} = 600 \text{ m}$ antes de que deba reemplazarse.

Como el volumen del material removido es directamente proporcional a la distancia recorrida por la herramienta, se puede ver que con la *disminución* de la velocidad de corte se remueve *más* material entre los cambios de herramienta. Sin embargo, es importante notar que cuanto más baja sea la velocidad de corte, más largo será el tiempo requerido para maquinar una parte, lo que tiene un efecto económico significativo en la operación (vea la sección 25.8).

TABLA 21.4

Pista de desgaste promedio permisible (vea *VB* en la figura 21.15a) para herramientas de corte en varias operaciones de maquinado

Operación	Pista de desgaste permisible (mm)	
	Herramientas de acero de alta velocidad	Herramientas de carburo
Torneado	1.5	0.4
Fresado frontal	1.5	0.4
Fresado de acabado	0.3	0.3
Taladrado	0.4	0.4
Escariado	0.15	0.15

Nota: La pista de desgaste permisible para herramientas de material cerámico es mayor en alrededor de 50%; el desgaste permisible para una muesca (vea la sección 21.5.3), $VB_{m\acute{a}s}$, es casi lo doble del *VB*.

21.5.2 Desgaste por formación de cráter

El *desgaste por formación de cráter* (o craterización) ocurre en la cara de ataque de la herramienta, como se muestra en las figuras 21.15a y c y en la figura 21.18, la cual ilustra varios tipos de desgaste y fallas de la herramienta. Es fácil ver que el desgaste por formación de cráter cambia la geometría del contacto de la interfase herramienta-viruta. Los factores más significativos que influyen en la craterización son (a) la temperatura en la interfase herramienta-viruta y (b) la afinidad química de la herramienta y los materiales de la pieza de trabajo. Además, los mismos factores que influyen en el desgaste del flanco también afectan el de un cráter.

La craterización se atribuye, en general, a un **mecanismo de difusión**; es decir, al movimiento de los átomos a través de la interfase herramienta-viruta. Como la velocidad de difusión se incrementa con el aumento de temperatura, el desgaste por formación de cráter se incrementa conforme lo hace la temperatura. En la figura 21.19, por ejemplo, note lo rápido que aumenta el desgaste por craterización con la temperatura en un rango estrecho. Aplicar *recubrimientos* protectores a las herramientas es una medida eficaz para reducir el proceso de difusión y con

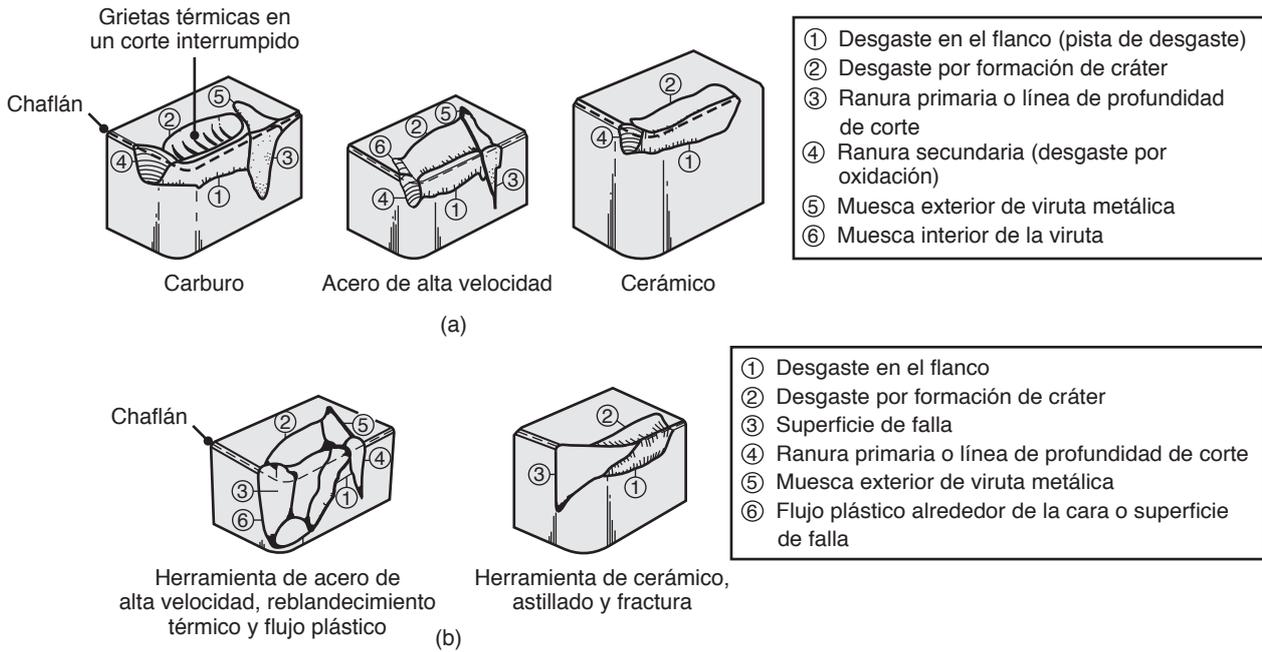


FIGURA 21.18 (a) Ilustraciones esquemáticas de los tipos de desgaste observados en diferentes herramientas de corte. (b) Ilustraciones esquemáticas de fallas catastróficas de herramientas. Un rango amplio de parámetros influye en estos modos de desgaste y falla. *Fuente:* Impreso con permiso de V. C. Venkatesh.

ello disminuir el desgaste por formación de cráter. Los recubrimientos comunes para las herramientas contemplan: nitruro de titanio, carburo de titanio, carbonitruro de titanio y óxido de aluminio, y se describen con mucho detalle en la sección 22.6.

Al comparar las figuras 21.12 y 21.15a, se puede ver que la ubicación de la *profundidad máxima* del desgaste por formación de cráter, *KT*, coincide con la ubicación de la *temperatura máxima* en la interfase herramienta-viruta. La sección transversal real de esta interfase, para acero maquinado a altas velocidades, se ilustra en la figura 21.20. Note que el patrón de desgaste por formación de cráter sobre la herramienta coincide con su patrón de decoloración, que es un indicativo de la presencia de altas temperaturas.

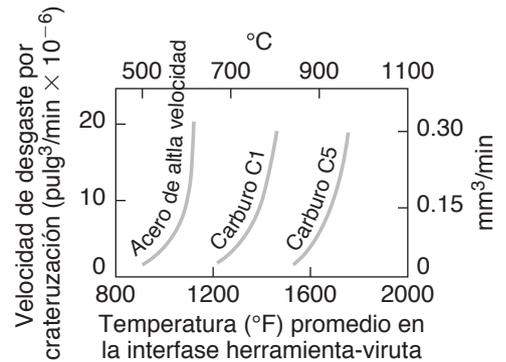


FIGURA 21.19 Relación entre la velocidad de desgaste por formación de cráter y la temperatura promedio presente en la interfase herramienta-viruta. Note que el rápido que aumenta la velocidad de desgaste por formación de cráter con un incremento de la temperatura. *Fuente:* Según B. T. Chao y K. J. Trigger.

21.5.3 Otros tipos de desgaste, astillado y fractura

El **desgaste de nariz**, o **mellado**, (figura 21.15a) es el redondeo del filo de una herramienta debido a efectos mecánicos y térmicos. Dicho desgaste mella la herramienta, afecta la formación de viruta y ocasiona que la herramienta roce contra la pieza de trabajo, lo que eleva su temperatura e induce esfuerzos residuales sobre la superficie maquinada. Un fenómeno relacionado es el **redondeo del filo**, como se ilustra en la figura 21.15a.

El incremento de la temperatura es particularmente dañino para las herramientas de acero de alta velocidad, como se aprecia en la figura 22.1. Las herramientas también sufren **deformación plástica** debido a los aumentos de temperatura en la zona de corte, donde se alcanzan con facilidad los 1000 °C (1800 °F) al maquinado aceros y pueden ser mayores en función de la resistencia del material maquinado.

Las **ranuras** o **muecas** observadas en las herramientas de corte, como en las figuras 21.15a y 21.18, se atribuyen al hecho de que la región en que ocurren es el límite en que la viruta ya no está en contacto con la herramienta. Conocido como **línea de profundidad**

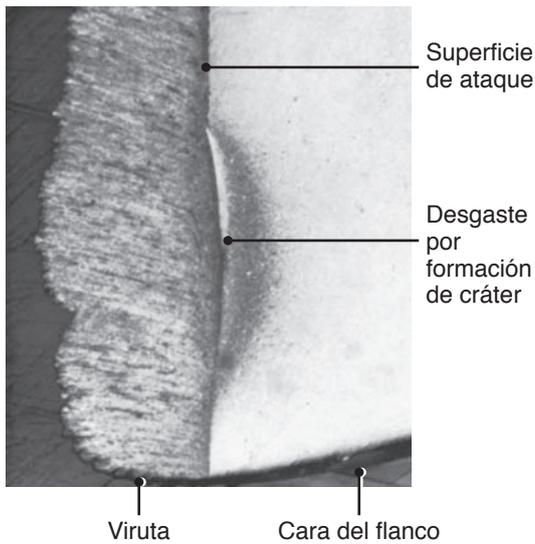


FIGURA 21.20 Interfase de una herramienta de corte (derecha) y una viruta (izquierda) al maquinado de acero al bajo carbono; la decoloración de la herramienta indica la presencia de altas temperaturas (compare esta figura con los perfiles de temperatura mostrados en la figura 21.12). Fuente: Cortesía de P. K. Wright.

del corte (DOC, por sus siglas en inglés) (vea la figura 21.15a), dicho límite oscila debido a las variaciones inherentes en la operación de corte. En el corte ortogonal o con bajas velocidades de avance, esta región está al menos parcialmente en contacto con la nueva superficie generada por el maquinado; la delgada capa de endurecimiento por trabajo que se puede desarrollar en la pieza de trabajo contribuirá a la formación de la ranura de desgaste. Si es lo bastante profunda, la ranura evolucionará hacia el astillado de la punta de la herramienta debido a (a) su ya reducida sección transversal y (b) la sensibilidad a la muesca del material de la herramienta.

Las *capas de escamas* (o *cascarillas*) y óxido en la superficie de una pieza de trabajo también contribuyen al desgaste por muesca, ya que dichas capas son duras y abrasivas; así, no se deben practicar los cortes ligeros en piezas de trabajo con tales capas. Por ejemplo, en la figura 21.3, la profundidad de corte, t_o , debe ser mayor que el espesor de la escama sobre la pieza de trabajo.

Además de estar sujetas al desgaste, las herramientas de corte pueden sufrir **astillado** (o **despostillado**), con lo que se desprende un pequeño fragmento del filo de corte de la herramienta. Este fenómeno, que es común ocurra en materiales para herramientas que son frágiles, como los cerámicos; es parecido al astillado de la punta de un lápiz si está demasiado afilada. Los fragmentos astillados de la herramienta de corte pueden ser muy pequeños (se llaman **microastillas** o **macroastillas** según su tamaño) o relativamente grandes, en cuyo caso se denominan indistintamente **astillado burdo**, **fractura burda** y **fractura catastrófica** (vea la figura 21.18).

El astillado también ocurre en una región de la herramienta en la cual ya existe una pequeña grieta o un defecto generado durante su producción. A diferencia del desgaste, que es un proceso gradual, el astillado es una pérdida súbita de material de la herramienta, con lo que cambia la forma de la herramienta. Como es de esperarse, el astillado tiene un efecto muy dañino en el acabado superficial, en su integridad y en la precisión dimensional de la pieza de trabajo.

Las dos causas principales del astillado son las siguientes:

- **Choque mecánico**, como un impacto debido a interrupción del corte, digamos, al girar un eje roto en un torno.
- **Fatiga térmica**, debido a variaciones cíclicas en la temperatura de la herramienta en un corte interrumpido.

Las **grietas térmicas** son, por lo general, perpendiculares a la arista de corte de la herramienta, como se aprecia en la superficie de ataque de la herramienta de carburo en las figuras 21.15d y 21.18a. Las grandes variaciones en la composición o estructura del material de la pieza de trabajo también provocan astillado por diferencias en sus propiedades térmicas.

El astillado se puede reducir al seleccionar materiales con mucha resistencia al impacto y al choque térmico para hacer las herramientas, como se describe en el capítulo 22. Los ángulos de ataque grandes y positivos contribuyen al astillado debido al pequeño ángulo incluido de la punta de la herramienta, como se puede visualizar en la figura 21.3. Asimismo, es posible que la región de craterización avance en dirección de la punta de la herramienta, lo que la debilita debido a la reducción del volumen de material.

21.5.4 Monitoreo de la condición de la herramienta

Con el rápido avance y la evolución experimentada en las máquinas herramientas controladas por computadora y la manufactura automatizada, el desempeño confiable y repetible de las herramientas de corte se ha vuelto una consideración muy importante. Como se describe en los capítulos 23 a 25, las máquinas herramientas modernas operan con poca supervisión directa del operador y, por lo general, se encuentran aisladas, lo que hace imposible o difícil vigilar su operación y la condición que guarda la herramienta de

corte. Por lo tanto, resulta esencial vigilar continua e indirectamente la condición de la herramienta de corte con el fin de detectar si hay, por ejemplo, desgaste excesivo, astillamiento o una falla grave de la herramienta. En las máquinas herramientas modernas, los sistemas de vigilancia de la condición de la herramienta están integrados a controladores lógicos programables y a control numérico computarizado.

Es común que las técnicas para monitorear la condición de la herramienta se dividan en dos categorías generales: directas e indirectas. El **método directo** de observar la condición de una herramienta de corte involucra mediciones *ópticas* del desgaste, como la observación periódica de los cambios ocurridos en el perfil de la herramienta. Ésta es una técnica común y confiable y se realiza con el uso de un microscopio (*microscopio de fabricante de herramientas*). Sin embargo, el método requiere que la operación de corte se detenga para hacer la observación. Otro método directo involucra la programación de la herramienta para que entre en contacto con un sensor después de cada ciclo de maquinado; este enfoque permite la medición del desgaste y/o la detección de herramientas rotas. Por lo general, el sensor incluye una sonda de contacto la cual debe presionarse contra la punta de la herramienta.

Los **métodos indirectos** involucran la correlación de la condición de la herramienta con parámetros tales como las fuerzas de corte, la potencia, el aumento de temperatura, el acabado de la superficie de la pieza de trabajo, vibración y traqueteo. Una técnica común es la **emisión acústica** (AE, por sus siglas en inglés), la cual utiliza un *transductor piezoeléctrico* montado en el soporte de la herramienta. El transductor recoge emisiones acústicas (por lo común arriba de los 100 kHz) que se originan en las ondas de esfuerzo generadas durante el corte. Con el análisis de las señales es posible vigilar el desgaste y despostillado de la herramienta. Esta técnica es particularmente efectiva en las operaciones de maquinado de precisión, donde las fuerzas de corte son débiles (debido a las pequeñas cantidades de material removido). Otro uso efectivo de la emisión acústica es la detección de la fractura de herramientas pequeñas de carburo a velocidades altas de corte.

Un sistema indirecto similar de monitoreo de la condición de la herramienta consta de **transductores** que se instalan en máquinas herramientas originales o se ajustan a máquinas preexistentes. El sistema vigila continuamente el torque y las fuerzas que se generan durante el corte. Las señales se amplifican y un microprocesador analiza e interpreta su contenido. El sistema es capaz de distinguir señales provenientes de distintas fuentes, como la fractura de una herramienta, su desgaste, la falta de herramienta, la sobrecarga de la máquina herramienta o la colisión con otros de sus componentes. El sistema también puede compensar en forma automática el desgaste de la herramienta y con ello mejorar la precisión dimensional de la parte que se ha de maquinar.

El diseño de los transductores debe ser tal que sean (a) no intrusivos para la operación de maquinado; (b) exactos y repetibles en la detección de señales; (c) resistentes al abuso y robustos para soportar el ambiente del taller (vea las secciones 36.5.1 y 40.7) y (d) eficientes en cuanto al costo. En el desarrollo de **sensores** hay un avance continuo, inclusive en el uso de *técnicas infrarrojas y de fibra óptica* para medición de la temperatura durante el maquinado.

Para abatir el costo de las máquinas herramientas de control numérico, el monitoreo se efectúa por medio de un **tiempo del ciclo de la herramienta**. En el entorno de producción, una vez que se ha determinado la esperanza de vida de una herramienta de corte o de un inserto, el sistema se integra a la unidad de control de la máquina de modo que el operador reciba un aviso para que cambie la herramienta cuando transcurre dicho tiempo. Este sistema no es caro y resulta muy confiable, aunque no totalmente debido a la variación estadística inherente a la vida de la herramienta.

21.6 Acabado e integridad de la superficie

El acabado superficial influye no sólo en la precisión dimensional de las partes maquinadas sino también en sus propiedades y desempeño en el servicio. El término *acabado superficial* describe las características geométricas de una superficie (vea el capítulo 33) y la *integridad de la superficie* se refiere a las propiedades del material, tales como su resistencia a la fatiga y a la corrosión, que se ven muy influidas por la naturaleza de la superficie producida.

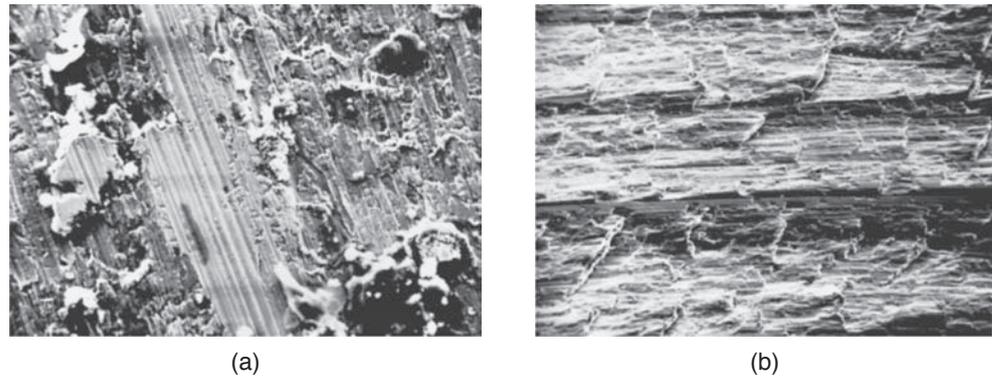


FIGURA 21.21 Superficies maquinadas producidas en acero (muy ampliadas) según se observan con un microscopio electrónico de barrido: (a) superficie torneada y (b) superficie producida por remoción de material para dar forma. Fuente: Cortesía de JT Black y S. Ramalingam.

Con su significativo efecto en el cambio del perfil de la punta de la herramienta, el *borde acumulado* (vea la figura 21.6) tiene la influencia más grande en el acabado superficial. En la figura 21.21 se muestran las superficies producidas en dos operaciones diferentes de corte. Observe el considerable daño producido a las superficies debido al borde acumulado; el daño puede detectarse por las marcas abrasivas, que se desvían de las ranuras o surcos rectos que resultarían del maquinado normal, como se observa en la figura 21.2. Por lo general, las herramientas hechas a partir de materiales cerámicos y de diamante producen un mejor acabado superficial que otras herramientas, en gran medida por su menor tendencia a formar un borde acumulado.

Una herramienta *mellada* tiene un gran radio a lo largo de sus bordes, igual que la punta de un lápiz o el filo de un cuchillo mellados. La figura 21.22 ilustra la relación entre el radio del filo de corte y la profundidad de corte en el corte ortogonal. Note que con profundidades de corte pequeñas, el ángulo efectivo de ataque se vuelve negativo y la herramienta simplemente avanza sobre la pieza de trabajo en lugar de cortarla y producir virutas. Éste es un fenómeno similar a tratar de raspar una capa delgada de la superficie de una barra de mantequilla con un cuchillo sin filo.

Si el radio de la punta de la herramienta (no confundir con el radio R que se muestra en la figura 21.15a) es grande en relación con la profundidad de corte, la herramienta simplemente rozará sobre la superficie maquinada. Ese roce generará calor e inducirá esfuerzos superficiales residuales que a su vez ocasionarán daño en la superficie, como rasgaduras y grietas. En consecuencia, la profundidad de corte debe ser mayor que el radio en el filo de corte.

En una operación de torneado, como en otros procesos de corte descritos en el resto de la parte IV de este texto, la herramienta deja un perfil espiral (llamado **marcas de avance**) en la superficie maquinada a medida que se desplaza a través de la pieza de trabajo, como se muestra en las figuras 21.2 y 21.23. Se observa que cuanto mayor sea el avance, f , y más pequeño sea el radio de la nariz de la herramienta, R , más prominentes serán las marcas generadas por el avance. Es posible demostrar que la rugosidad superficial, para un caso como el descrito, está dada por

$$R_t = \frac{f^2}{8R}, \quad (21.30)$$

donde R_t es la *altura de la rugosidad*, como se describe en la sección 33.3. Aunque no son significativas en las operaciones de maquinado burdo, las marcas de avance son importantes en el maquinado de acabado (más detalles sobre la rugosidad superficial para procesos individuales de maquinado se darán conforme se describan).

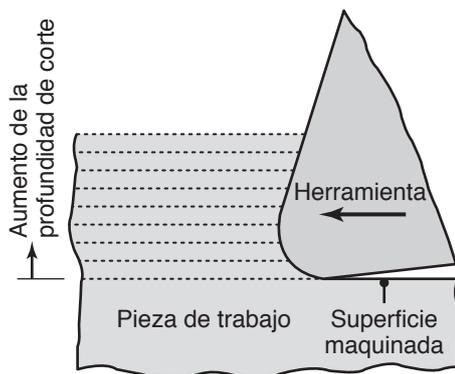


FIGURA 21.22 Ilustración esquemática de una herramienta mellada con respecto a la profundidad de corte en un maquinado ortogonal (exagerado); observe que la herramienta tiene un ángulo de ataque positivo, pero conforme disminuye la profundidad de corte, el ángulo efectivo de ataque puede hacerse negativo. En ese caso, la herramienta simplemente se desliza sobre la pieza de trabajo (sin cortarla) y pule su superficie; esta acción eleva la temperatura de la pieza y genera esfuerzos residuales en la superficie y cambios metalúrgicos.

En la sección 25.4 se describen con detalle la *vibración* y el *traqueteo*. Por ahora debe reconocerse que si la herramienta vibra o se mueve durante el corte, afectará adversamente el acabado superficial de la pieza de trabajo. La razón es que una herramienta que vibra cambia periódicamente las dimensiones del corte. El traqueteo excesivo también ocasiona astillado y falla prematura de las herramientas de corte frágiles, como los cerámicos y el diamante.

Los factores que afectan la integridad de la superficie son:

- Las temperaturas generadas durante el procesamiento y las posibles transformaciones metalúrgicas.
- Esfuerzos residuales superficiales.
- Severa deformación plástica y endurecimiento por deformación de las superficies maquinadas, desgarraduras y grietas.

Cada uno de estos factores tiene efectos adversos graves en la parte maquinada, aunque se pueden prevenir por medio de la selección cuidadosa y el mantenimiento de las herramientas de corte, así como al mantener el control de las variables del proceso.

Debe hacerse énfasis en la diferencia entre el **maquinado de acabado** y el **maquinado burdo** o **de desbaste**. En el maquinado de acabado es importante considerar el acabado superficial por producir, mientras que en el maquinado burdo el propósito principal es remover una gran cantidad de material a un ritmo intenso. El acabado superficial no es una consideración primaria, ya que se mejorará durante el maquinado de acabado. Es importante que no haya daño subsuperficial resultante del maquinado burdo o de desbaste que no se pueda eliminar durante el maquinado de acabado (vea la figura 21.21).

21.7 Maquinabilidad

La *maquinabilidad* de un material se define, por lo general, en términos de cuatro factores:

1. Acabado superficial e integridad de la superficie de la parte maquinada.
2. Vida de la herramienta.
3. Requerimientos de fuerza y potencia.
4. Nivel de dificultad en el control de la viruta una vez que se genera.

Así, una buena maquinabilidad indica un buen acabado superficial e integridad de la superficie, una vida larga de la herramienta y bajos requerimientos de fuerza y potencia. Igual que sucede con el control de la viruta, y como se dijo antes en relación con las virutas continuas, aquellas que son largas, delgadas, enmarañadas y rizadas interfieren severamente con la operación de maquinado porque se enredan en la zona de corte (vea la figura 21.7).

Debido a la naturaleza compleja de las operaciones de corte es difícil establecer relaciones que definan en forma cuantitativa la maquinabilidad de un material en particular. En la práctica del maquinado, generalmente se considera que la vida de la herramienta y la rugosidad superficial no son los factores más importantes de la maquinabilidad. Durante muchos años se han desarrollado **calificaciones de maquinabilidad** aproximadas (índices) para cada tipo de material y su condición; sin embargo, no son particularmente útiles o confiables debido a su naturaleza cualitativa. En los capítulos siguientes se presentan varias tablas que incluyen *recomendaciones específicas* para distintos grupos de materiales con parámetros como velocidad de corte, avance, profundidad de corte, herramientas de corte y su forma y tipos de fluidos de corte.

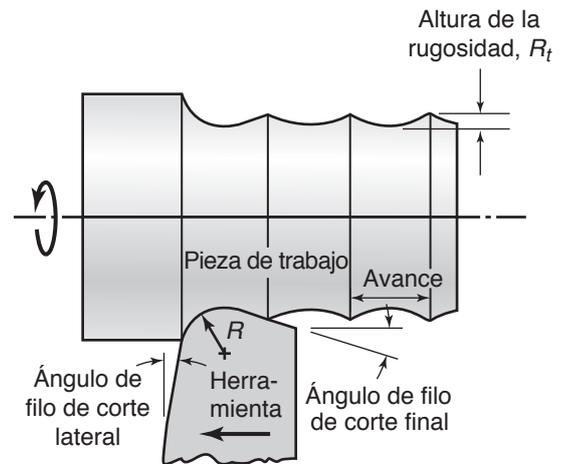


FIGURA 21.23 Ilustración esquemática de las marcas de avance en una superficie sujeta a torneado (exagerada).

21.7.1 Maquinabilidad de metales ferrosos

Esta sección describe la maquinabilidad de aceros, aleaciones de acero, aceros inoxidables y hierro fundido.

Aceros. Debido a que los aceros se encuentran entre los materiales de ingeniería más importantes, como ya observamos en el capítulo 5, su maquinabilidad ha sido estudiada extensamente. Los aceros al carbono tienen un rango amplio de maquinabilidad, lo que depende de su ductilidad y dureza. Si un acero al carbono es demasiado dúctil puede desarrollarse un borde acumulado, lo que lleva a un mal acabado de la superficie. Si el acero es demasiado duro puede ocasionar el desgaste abrasivo de la herramienta debido a la presencia de carburos en el acero. Desde el punto de vista de la maquinabilidad, son preferibles los aceros al carbono trabajados en frío.

Un grupo importante de aceros son los de **libre maquinado** que contienen azufre y fósforo. El *azufre* forma inclusiones de sulfuro de manganeso (*partículas de segunda fase*, sección 4.2.3) que actúan como acumuladores de tensión en la zona primaria de corte. Como resultado, las virutas producidas se rompen con facilidad y son pequeñas, lo que mejora la maquinabilidad. El tamaño, la forma, distribución y concentración de dichas inclusiones influye de manera significativa en la maquinabilidad. Elementos tales como el *telurio* y el *selenio*, que tienen una química similar a la del azufre, actúan como *modificadores de las inclusiones* en los aceros resulturados.

En los aceros el *fósforo* tiene dos efectos principales: (a) fortalece la ferrita, lo que ocasiona mayor dureza y da como resultado mejor formación de virutas y acabado superficial, y (b) aumenta la dureza, causando la formación de virutas cortas en lugar de cadenas continuas, lo que mejora la maquinabilidad. Los aceros suaves son difíciles de maquinar por su tendencia a la formación de borde acumulado y el mal acabado superficial resultante.

En los **aceros con plomo**, un gran porcentaje de plomo se solidifica en los extremos de las inclusiones de sulfuro de manganeso. En los grados no resulturados de acero, el plomo adopta la forma de partículas dispersas finas. El plomo es insoluble en hierro, cobre y aluminio y sus aleaciones y, debido a su baja resistencia cortante, actúa como un lubricante *sólido* (vea la sección 33.7.6) y queda embarrado sobre la interfase herramienta-viruta durante el maquinado.

Cuando la temperatura desarrollada es lo suficientemente alta, como sucede con las velocidades de corte y los avances, el plomo se funde directamente frente a la herramienta y actúa como un lubricante líquido. Además de tener este efecto, el plomo disminuye el esfuerzo cortante en la zona primaria de corte, lo que reduce las fuerzas de corte y el consumo de energía. El plomo puede usarse con cada grado de acero y se identifica con una “L” entre el segundo y el tercer numeral en la señalización del acero (por ejemplo, 10L45). En los aceros inoxidables, un uso similar de la L significa “bajo carbono”, lo cual mejora su resistencia a la corrosión.

Debido a que el plomo es una *toxina* muy conocida y un contaminante, hay diversas e importantes preocupaciones ambientales sobre su uso en los aceros (se estima que en la producción de aceros cada año se consumen unas 4500 toneladas de plomo). Por lo tanto, hay una tendencia permanente hacia su eliminación en los aceros (**aceros libres de plomo**). El *bismuto* y la *hojalata* son sustitutos del plomo en los aceros, pero no son tan efectivos para mejorar su maquinabilidad.

Los **aceros con óxidos de calcio** contienen hojuelas de óxido de silicatos de calcio (CaSO) que reducen la resistencia de la zona secundaria de corte y disminuyen la fricción y el desgaste en la interfase herramienta-viruta. Debido a que el incremento de temperatura disminuye en correspondencia, estos aceros producen menos desgaste por formación de cráter, en especial a altas velocidades de corte.

Las **aleaciones de acero** pueden tener una gran variedad de composiciones y durezas, por lo que no puede generalizarse sobre su maquinabilidad. Una tendencia importante en el maquinado de estos aceros es el *torneado para piezas con alta dureza*, el cual está descrito con detalle en la sección 25.6. Las aleaciones de acero con niveles de dureza de 45-65 HRC pueden maquinarse con herramientas de corte policristalinas de nitruro de boro cúbico (cBN, vea la sección 22.7) y producen buen acabado e integridad superficiales y buena precisión dimensional.

Efectos de distintos elementos en los aceros. La presencia de *aluminio* y *silicio* en los aceros siempre es dañina porque dichos elementos se combinan con el oxígeno y forman óxidos de aluminio y silicatos, que son duros y abrasivos. Como resultado, se incrementa el desgaste de la herramienta y se reduce la maquinabilidad de los aceros.

El *carbono* y el *manganeso* tienen varios efectos en la maquinabilidad de los aceros, lo cual depende de su composición. Los aceros de bajo carbono (menos de 0.15% C) pueden producir un mal acabado superficial por la formación de borde acumulado. Los aceros fundidos pueden ser abrasivos, aunque su maquinabilidad es similar a la de los aceros forjados. Las herramientas y los troqueles de acero son muy difíciles de maquinar y, por lo general, requieren ser recocidos antes de maquinarlos. La maquinabilidad de la mayoría de los aceros se mejora con el trabajo en frío, lo cual endurece el material y reduce la tendencia a la formación de borde acumulado.

Otros elementos de aleaciones, como el *níquel*, *cromo*, *molibdeno* y *vanadio*, que mejoran las propiedades de los aceros, también suelen reducir la maquinabilidad. El efecto del *boro* es insignificante. Elementos gaseosos como el *hidrógeno* y el *nitrógeno* pueden tener efectos particularmente dañinos en las propiedades del acero. Se ha demostrado que el oxígeno tiene mucho efecto en la razón de aspecto de las inclusiones de sulfuro de manganeso. A mayor contenido de oxígeno, menor es la razón de aspecto y mayor la maquinabilidad.

En la mejora de la maquinabilidad de los aceros es importante considerar también los posibles efectos perjudiciales de los elementos de aleación en las propiedades y dureza de las partes maquinadas en servicio. Por ejemplo, a temperaturas elevadas el plomo ocasiona que el acero se *fragilice* (fragilización por metal líquido y fragilidad en caliente; vea la sección 1.5.2), aunque a temperatura ambiente no tiene efecto en sus propiedades mecánicas.

El azufre reduce severamente la capacidad del trabajo en caliente de los aceros debido a la formación de sulfuro de hierro, a menos que haya suficiente manganeso presente para impedir esa formación. A temperatura ambiente las propiedades mecánicas de los aceros resultados dependen de la orientación de las inclusiones deformadas de sulfuro de manganeso. Los aceros refosforados son mucho menos dúctiles y se producen únicamente con el propósito de mejorar la maquinabilidad.

Aceros inoxidables. Los aceros austeníticos (serie 300) son, por lo general, difíciles de maquinar. El traqueteo puede ser un problema, por lo que se necesitan máquinas herramientas con mucha rigidez. Los aceros inoxidables ferríticos (serie 400) tienen buena maquinabilidad. Los aceros martensíticos (serie 400) son abrasivos, tienden a formar borde acumulado y requieren en las herramientas materiales con mucha dureza caliente y alta resistencia al desgaste por formación de cráter. Los *aceros inoxidables endurecidos por precipitación* son resistentes y abrasivos, por lo que requieren herramientas hechas de materiales duros y resistentes a la abrasión.

Hierros fundidos. Los *hierros grises* generalmente son maquinables, aunque pueden resultar abrasivos dependiendo de su composición, sobre todo la perlita. En las fundiciones, los carburos libres reducen su maquinabilidad y ocasionan despostillado y fractura de la herramienta. Los hierros *nodulares* y *maleables* son maquinables cuando se usan herramientas hechas con materiales duros.

21.7.2 Maquinabilidad de metales no ferrosos

A continuación se presenta un resumen de la maquinabilidad de metales y aleaciones no ferrosas:

- **Aluminio.** Por lo general es muy fácil de maquinar, aunque los grados más suaves tienden a formar borde acumulado que resulta en un mal acabado superficial; así, son recomendables las altas velocidades de corte, ángulos de ataque grandes y ángulos de incidencia o alivio grandes. Las aleaciones de aluminio forjado con alto

contenido de silicio y las aleaciones de aluminio fundido son abrasivas, de modo que requieren herramientas con materiales más duros. Al maquinar aluminio el control de la tolerancia dimensional llega a ser un problema debido a que tiene un coeficiente de expansión térmica elevado y un módulo de elasticidad relativamente bajo.

- **Berilio.** Es maquinable, pero como las partículas finas que se producen durante su maquinado son tóxicas, se requiere maquinarlo en un ambiente controlado.
- **Aleaciones base cobalto.** Son abrasivas y muy difíciles de trabajar; requieren herramientas hechas de materiales afilados, resistentes a la abrasión y bajos avances y velocidades.
- **Cobre.** En condición de forjado es difícil de maquinar ya que se forma borde acumulado; pero las aleaciones de cobre fundido son fáciles de maquinar. Los latones son fáciles de maquinar, en especial mediante la adición de plomo (*latones con plomo para libre maquinado*); sin embargo, debe tenerse en cuenta la toxicidad del plomo y las preocupaciones ambientales asociadas. Los broncees son más difíciles de maquinar que el latón.
- **Magnesio.** Es muy fácil de maquinar, con buen acabado superficial y larga vida de la herramienta; sin embargo, debe tenerse cuidado debido a su alta rapidez de oxidación (*pirofórico*) y al peligro de incendio.
- **Molibdeno.** Es dúctil y difícil de trabajar; produce un mal acabado superficial por lo que resulta esencial utilizar herramientas afiladas.
- **Aleaciones base níquel y superaleaciones.** Son difíciles de trabajar, abrasivas y resistentes a altas temperaturas; su maquinabilidad depende de su condición y mejora con el recocido.
- **Tantalio.** Es muy difícil de trabajar, dúctil y suave, y produce un mal acabado superficial además de un gran desgaste de la herramienta.
- **Titano.** Junto con sus aleaciones, tiene muy mala conductividad térmica (la menor de todos los metales; vea la tabla 3.2), lo que ocasiona un aumento de temperatura significativo y borde acumulado; sus aleaciones son muy reactivas y difíciles de maquinar.
- **Tungsteno.** Es frágil, resistente y muy abrasivo; por lo tanto su maquinabilidad es baja, aunque mejora mucho a temperaturas elevadas.
- **Circonio.** Tiene buena maquinabilidad, pero requiere un tipo de fluido de corte refrigerante por el peligro de explosión e incendio.

21.7.3 Maquinabilidad de diversos materiales

Los **polímeros termoplásticos** tienen, por lo general, baja conductividad térmica y bajo módulo de elasticidad; además, se ablandan con el calor. En consecuencia, su maquinado requiere herramientas afiladas con ángulos de ataque positivos (para reducir las fuerzas de corte), ángulos de alivio o incidencia frontal grandes, profundidades de corte pequeñas, velocidades de avance relativamente altas y soporte apropiado de la pieza de trabajo. Puede ser necesario el enfriamiento externo de la zona de corte para impedir que las virutas se vuelvan pegajosas y se adhieran a las herramientas de corte. Por lo general, el enfriamiento se logra con un chorro de aire, una nube de vapor o utilizando aceites solubles en agua.

Los **polímeros termofijos** son frágiles y sensibles a los gradientes térmicos durante el corte; por lo general, las condiciones de maquinado son similares a las de los termoplásticos.

Los **materiales compósitos de matriz polimérica** son muy abrasivos debido a las fibras presentes, por lo cual son difíciles de maquinar. El rasgado y jalado de las fibras de los compósitos y el delaminado del filo son problemas importantes y pueden llevar a una fuerte reducción de la capacidad de carga de los componentes del maquinado. Maquinar estos materiales requiere un manejo cuidadoso, así como la eliminación del polvo para evitar el contacto o la inhalación de las fibras.

Los **materiales compósitos de matriz metálica y matriz de cerámicos** pueden ser difíciles de maquinar, lo que depende de las propiedades del material de la matriz y de las fibras de refuerzo.

El **grafito** es abrasivo; requiere herramientas afiladas, duras y resistentes a la abrasión.

Los materiales **cerámicos** actuales tienen cada vez mejor maquinabilidad, en particular con el desarrollo de *cerámicos maquinables* y nanocerámicos (vea la sección 8.2.5) y

con la selección de parámetros apropiados de procesamiento, como un régimen dúctil de corte (descrito en la sección 25.7).

La **madera** es un material *ortotrópico*, sus propiedades varían con la dirección de su grano; en consecuencia, el tipo de virutas y superficies producidas también varían significativamente, lo que depende del tipo de madera y de su condición. El trabajo en madera, que se remonta a 3000 años a. C, continúa siendo un arte. Los requerimientos básicos son generalmente de herramientas afiladas y altas velocidades de corte.

21.7.4 Maquinado asistido térmicamente

Los metales y las aleaciones que son difíciles de maquinar a temperatura ambiente pueden maquinarse con más facilidad a temperaturas elevadas. En el maquinado asistido térmicamente, llamado también maquinado en caliente, se concentra una fuente de calor (como un soplete, una bobina inductora, una corriente eléctrica, un rayo láser, un haz de electrones o un arco de plasma) sobre un área ubicada apenas por delante de la herramienta de corte. Esta operación se investigó por primera vez en la década de 1940 y, por lo común, se lleva a cabo sobre la *temperatura homóloga* de $T/T_m = 0.5$ (vea la sección 1.7 y las tablas 1.2 y 3.1); así, los aceros son maquinados en caliente por arriba del rango de temperatura de 650 a 750 °C (1200 a 1400 °F).

Aunque es difícil y complicado realizarlo en las plantas de producción, las ventajas generales del maquinado en caliente son: (a) reducción de las fuerzas de corte, (b) vida más larga de la herramienta, (c) reducción mayor de material y (d) menor tendencia a la vibración y el traqueteo.

RESUMEN

- En ocasiones es necesario aplicar procesos de maquinado para lograr la precisión dimensional deseada, las características geométricas y de acabado superficial de los componentes, en particular de aquellos con formas complejas que no pueden producirse de manera económica empleando otras técnicas de formado. Por otro lado, el maquinado suele tomar más tiempo, desperdicia material en forma de virutas, no afecta las propiedades generales de la pieza de trabajo y puede tener efectos adversos en las superficies producidas.
- Los tipos de virutas comúnmente observados en el maquinado son virutas continuas, de borde acumulado, discontinuas y escalonadas. Las variables del proceso que son importantes en el maquinado son la forma de la herramienta y el material de que está hecha; condiciones de corte como la velocidad, el avance y la profundidad de corte; el uso de fluidos de corte y las características del material de la pieza de trabajo y de la máquina herramienta. Los parámetros que se ven influidos por estas variables son las fuerzas y el consumo de energía, el desgaste de la herramienta, el acabado y la integridad superficiales; el aumento de la temperatura y la precisión dimensional de la pieza de trabajo.
- El aumento de la temperatura en el maquinado es una consideración importante ya que puede tener efectos perjudiciales en la vida de la herramienta, así como en la precisión dimensional y en la integridad superficial de la parte maquinada.
- Los dos tipos principales del desgaste de la herramienta son el desgaste en el flanco y el desgaste por formación de cráter. El desgaste de la herramienta depende de la pieza de trabajo y de las características del material con que se hizo; de la velocidad de corte, del avance, de la profundidad de corte y de los fluidos de corte, además de las características de la máquina herramienta. La falla de la herramienta ocurre también por muescas, astillado y fractura catastrófica.
- El acabado superficial de los componentes del maquinado puede afectar adversamente la integridad del producto. Las variables importantes son la geometría y la condición de la herramienta de corte, el tipo de viruta producida y las variables del proceso.

- La maquinabilidad se define generalmente en términos del acabado superficial, de la vida de la herramienta, de los requerimientos de fuerza y energía y del control de la viruta. La maquinabilidad de los materiales depende de su composición, sus propiedades y su microestructura. Son importantes también una selección apropiada y el control de las variables del proceso.

TÉRMINOS CLAVE

Acabado superficial	Corte ortogonal	Integridad de la superficie	Rasurado
Acero refosforado	Desgaste en el flanco	Línea de profundidad de corte	Razón de corte
Acero resultado	Desgaste por formación de cráter (craterización)	Máquina herramienta	Rompevirutas
Ángulo cortante o cizallamiento	Desgaste por muesca	Maquinabilidad	Torneado
Ángulo de ahusamiento	Difusión	Maquinado	Vida de la herramienta
Ángulo de alivio	Ecuación de Taylor	Maquinado en caliente	Viruta
Ángulo de ataque	Emisión acústica	Marcas por avance	Viruta continua
Ángulo de fricción	Energía específica	Monitoreo de la condición de la herramienta	Viruta discontinua
Ángulo de inclinación	Especificaciones de maquinabilidad	Pelado	Viruta escalonada
Astillado de la herramienta	Fuerza de corte	Pista de desgaste	Viruta rizada
Borde acumulado	Fuerza de empuje	Pista de desgaste permisible	Zona primaria de corte
Corte oblicuo		Plano de cizallamiento	Zona secundaria de corte

BIBLIOGRAFÍA

- ASM *Handbook*, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.
- Astakhov, V. P., *Metal Cutting Mechanics*, CRC Press, 1998.
- Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, 3a. ed., Marcel Dekker, 2006.
- Childs, T. H. C., Maekawa, K., Obikawa, T. y Yamane, Y., *Metal Machining: Theory and Applications*, Butterworth-Heinemann, 2000.
- Cormier, D., *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook*, McGraw-Hill, 2005.
- Davim, J. P. (ed.), *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, Springer, 2010.
- Davim, J. P. (ed.), *Surface Integrity in Machining*, Springer, 2010.
- Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles*, 2a. ed., Oxford, 2005.
- Stephenson, D. A. y Agapiou, J. S., *Metal Cutting: Theory and Practice*, 2a. ed., CRC Press, 2005.
- Trent, E. M. y Wright, P. K., *Metal Cutting*, 4a. ed., Butterworth-Heinemann, 2000.
- Tschatsch, H., *Applied Machining Technology*, Springer, 2009.

PREGUNTAS DE REPASO

- 21.1** Explique por qué no son deseables las virutas continuas.
- 21.2** Mencione los factores que contribuyen a la formación de virutas discontinuas.
- 21.3** ¿Cuál es la razón de corte? ¿Es siempre menor que 1? Explique su respuesta.
- 21.4** Explique la diferencia entre los ángulos de ataque positivo y negativo. ¿Cuál es la importancia del ángulo de ataque?
- 21.5** Explique la forma en que una herramienta mellada produce ángulos de ataque negativos.
- 21.6** Comente acerca del rol y de la importancia del ángulo de alivio.
- 21.7** Explique la diferencia entre las virutas discontinuas y las segmentadas.
- 21.8** ¿Por qué debe interesarnos la magnitud de la fuerza de empuje en el corte?
- 21.9** ¿Cuáles son las diferencias entre el corte ortogonal y el oblicuo?
- 21.10** ¿Qué es un borde acumulado? ¿Por qué se forma?

21.11 ¿Hay alguna ventaja en tener un borde acumulado en una herramienta? Explique su respuesta.

21.12 ¿Cuál es la función de los rompevirutas? ¿Cómo funcionan? ¿Se necesita un quebrador para eliminar las virutas continuas cuando se usa corte oblicuo? Explique su respuesta.

21.13 Identifique las fuerzas involucradas en una operación de corte. ¿Cuáles de estas fuerzas contribuyen a la energía requerida?

21.14 Explique las características de los diferentes tipos de desgaste de la herramienta.

21.15 Haga una lista de los factores que contribuyen para que resulte un mal acabado superficial durante el proceso de corte.

21.16 Explique qué significa el término maquinabilidad y lo que involucra. ¿Por qué tiene el titanio mala maquinabilidad?

21.17 ¿Qué es el rasurado en el proceso de maquinado? ¿Cuándo se usaría?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

21.18 Ponga en una lista las razones por las que se requieran operaciones de maquinado y proporcione un ejemplo de cada una.

21.19 ¿Están relacionadas las ubicaciones de la máxima temperatura y el desgaste por formación de cráter? Si así fuera, explíquelo.

21.20 ¿Es importante la ductilidad del material para la maquinabilidad? Explique su respuesta.

21.21 Explique por qué es importante el estudio de los tipos de viruta producida para entender las operaciones de corte.

21.22 ¿Por qué piensa usted que la temperatura máxima en el corte ortogonal se localiza cerca de la mitad de la interfase herramienta-viruta? (*Sugerencia:* note que las dos fuentes de calor son (a) de cizallamiento en el plano principal de cizallamiento y (b) la fricción en la interfase herramienta-viruta).

21.23 La vida de la herramienta puede ser casi infinita con velocidades de corte bajas. ¿Recomendaría usted que todo el maquinado se hiciera a bajas velocidades? Explique su respuesta.

21.24 Explique las consecuencias de permitir que las temperaturas alcancen niveles elevados en el corte.

21.25 La fuerza de corte se incrementa con la profundidad y disminuye con el ángulo de ataque. Explique por qué sucede esto.

21.26 ¿Por qué no siempre es aconsejable aumentar la velocidad de corte para incrementar la tasa de producción?

21.27 ¿Cuáles son las consecuencias de que una herramienta de corte se astille?

21.28 ¿Cuáles son los efectos de realizar una operación de corte con una herramienta sin filo? ¿Y con una muy afilada?

21.29 ¿A qué factores atribuye usted la diferencia en las energías específicas al maquinar los materiales que se mencionan en la tabla 21.2? ¿Por qué hay un rango de energías para cada grupo de materiales?

21.30 Explique por qué es posible eliminar más material entre cada operación de afilado de la herramienta si disminuye la velocidad de corte.

21.31 Al notar que en la figura 21.4a la dimensión d es muy pequeña, explique por qué la velocidad de deformación de corte en el corte de un metal es tan elevada.

21.32 Explique el significado de la ecuación (21.9).

21.33 Comente sus observaciones acerca de las figuras 21.12 y 21.13.

21.34 Describa las consecuencias de rebasar la pista de desgaste permisible (tabla 21.4) para los distintos materiales de la herramienta de corte.

21.35 Comente sus observaciones sobre las variaciones de dureza que aparecen en la figura 21.6a.

21.36 ¿Por qué durante el corte la temperatura depende de la velocidad de corte, del avance y de la profundidad de corte? Explique en términos de las variables de los procesos relevantes.

21.37 Usted habrá observado que los valores de a y b en la ecuación (21.24) son mayores para los aceros de alta velocidad que para los carburos. ¿Por qué es así?

21.38 Como se aprecia en la figura 21.14, el porcentaje de la energía total de corte eliminada por la viruta aumenta con el incremento de la velocidad de corte. ¿Por qué sucede esto?

21.39 Describa los efectos de una herramienta mellada en las operaciones de corte.

21.40 Explique si en la ecuación de Taylor para la vida de la herramienta es deseable tener valores altos o bajos para (a) n y (b) C .

21.41 La ecuación de Taylor para la vida de la herramienta es directamente aplicable al desgaste en el flanco. Explique si esta ecuación puede usarse o no para modelar la vida de la herramienta si dominaran otras formas de desgaste.

21.42 En la figura 21.17, la curva de vida para las herramientas de material cerámico está a la derecha de las curvas trazadas para otros materiales. ¿Por qué sucede esto?

21.43 ¿Por qué son bajas las temperaturas de las herramientas con velocidades de corte bajas y altas para velocidades de corte elevadas?

21.44 ¿Puede ejecutarse el maquinado de alta velocidad sin usar un fluido de corte?

21.45 Dada su comprensión del proceso básico del corte de metal, ¿cuáles son las propiedades físicas y químicas de una herramienta de corte?

21.46 Explique por qué en el proceso de corte los requerimientos de energía dependen de la fuerza de corte pero no de la fuerza de empuje.

21.47 Diga si los siguientes enunciados son verdaderos o no y comente las razones de su respuesta. (a) Para el mismo ángulo de corte, hay dos ángulos de ataque que dan la misma razón de corte. (b) Para la misma profundidad de corte y el mismo ángulo de ataque, el tipo de fluido de corte utilizado no tiene influencia en el espesor de la viruta. (c) Si se conocen la velocidad de corte, el ángulo de corte y el ángulo de ataque, es posible calcular la velocidad de la viruta. (d) La viruta se hace más delgada a medida que aumenta el ángulo de ataque. (e) La función de un rompevirutas es disminuir la curvatura de la viruta.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

21.48 En la ecuación de Taylor para el desgaste de la herramienta, sea $n = 0.5$ y $C = 400$. ¿Cuál es el incremento en el porcentaje de la vida de la herramienta si la velocidad de corte se reduce en (a) 50% y (b) 75 por ciento?

21.49 Suponga que, en el corte ortogonal, el ángulo de ataque es de 15° y el coeficiente de fricción de 0.2. Con el empleo de la ecuación (21.4), determine el incremento del porcentaje en el espesor de la viruta cuando se duplica la fricción.

21.50 Obtenga la ecuación (21.14).

21.51 Tome al carburo como ejemplo y use la ecuación (21.24) para determinar cuánto debe reducirse el avance con objeto de mantener constante la temperatura media cuando se duplica la velocidad de corte.

21.52 Utilice relaciones trigonométricas para obtener una expresión para la relación de la energía de corte a la energía de fricción, en el corte ortogonal, sólo en términos de los ángulos α , β y ϕ .

21.53 Una operación de corte ortogonal se realiza en las condiciones siguientes: $t_o = 0.1$ mm, $t_c = 0.2$ mm, ancho del corte = 4 mm, $V = 3$ m/s, ángulo de ataque = 10° , $F_c = 500$ N y $F_t = 200$ N. Calcule el porcentaje de la energía total que se disipa en el plano de corte.

21.54 Explique cómo estimaría usted los valores de C y n para los cuatro materiales para herramienta que se muestran en la figura 21.17.

21.55 Obtenga las ecuaciones (21.1) y (21.3).

21.56 Suponga que en el corte ortogonal, el ángulo de ataque, α , es de 20° y el ángulo de fricción, β , de 35° en la interfase viruta-herramienta. Determine el cambio porcentual en el espesor de la viruta cuando el ángulo de fricción es de 45° . [Nota: no use la ecuación (21.4) ni la (21.5)].

21.57 Demuestre que, para el mismo ángulo de corte, hay dos ángulos de ataque que dan la misma razón de corte.

21.58 Usando diagramas apropiados, demuestre la forma en que el uso de un fluido de corte puede cambiar la magnitud de la fuerza de empuje, F_t , en la figura 21.11. Considere tanto la transferencia de calor como los efectos de la lubricación.

21.59 En una operación de corte que usa un ángulo de ataque de -5° , las fuerzas que se midieron fueron $F_c = 1330$ N y $F_t = 740$ N. Cuando se empleó un fluido de corte, dichas fuerzas fueron $F_c = 1200$ N y $F_t = 710$ N. ¿Cuál es el cambio en el ángulo de fricción que resulta de usar el fluido?

21.60 Para una operación de torneado que usa una herramienta de material cerámico para cortar, si la velocidad se incrementa 50%, ¿en qué factor debe modificarse la rapidez del avance para obtener una vida constante para la herramienta? Use $n = 0.5$ y $y = 0.6$.

21.61 En el ejemplo 21.3, si se duplica la velocidad de corte V , ¿sería diferente la respuesta? Explique su razonamiento.

21.62 Utilizando la ecuación (21.30), seleccione un avance apropiado para $R = 1$ mm y una rugosidad deseada de $0.5 \mu\text{m}$. ¿Cómo ajustaría usted este avance para extender el desgaste permitido de nariz de esta herramienta durante cortes extensos? Explique su razonamiento.

21.63 Con una herramienta de carburo se mide la temperatura presente en una operación de corte y resulta ser de 1200°F

cuando la velocidad es de 300 pies/min y el avance de 0.002 pulg/rev. ¿Cuál es la temperatura aproximada si se duplica la velocidad? ¿Qué velocidad se requiere para disminuir a 900°F la máxima temperatura de corte?

21.64 En una serie de maquinados de prueba se obtuvieron los siguientes datos de desgaste en el flanco mediante herramientas de carburo C6 en acero 1045 (HB = 192). La rapidez en el avance fue de 0.015 pulg/rev y el ancho del corte fue de 0.030 pulgadas. (a) Grafique el desgaste del flanco como función del tiempo de corte. Con el empleo de un criterio de falla de la herramienta de 0.015 pulg como pista de desgaste permisible, determine las vidas para las dos velocidades de corte. (b) Grafique sus resultados en papel log-log y determine los valores de n y C en la ecuación de Taylor para la vida de la herramienta (suponga una relación lineal). (c) Con los resultados anteriores, calcule la vida de la herramienta para una velocidad de corte de 300 pies/minuto.

Velocidad de corte, pies/min	Tiempo de corte, min	Desgaste en el flanco, pulg
400	0.5	0.0014
	2.0	0.0023
	4.0	0.0030
	8.0	0.0055
	16.0	0.0082
	24.0	0.0112
	54.0	0.0150
600	0.5	0.0018
	2.0	0.0035
	4.0	0.0060
	8.0	0.0100
	13.0	0.0145
	14.0	0.0160
800	0.5	0.0050
	2.0	0.0100
	4.0	0.0140
	5.0	0.0160
1000	0.5	0.0100
	1.0	0.0130
	1.8	0.0150
	2.0	0.0160

21.65 Se dispone de los siguientes datos experimentales a partir de procesos de corte ortogonal. En ambos casos la profundidad de corte (avance) es $t_o = 0.13$ mm, el ancho del corte es $b = 2.5$ mm, el ángulo de ataque es $\alpha = -5^\circ$ y la velocidad del corte es $V = 2$ m/s.

	Material de la pieza de trabajo	
	Aluminio	Acero
Espesor de la viruta, t_c , mm	0.23	0.58
Fuerza de corte, F_c , N	430	890
Fuerza de empuje, F_t , N	280	800

Determine el ángulo de corte ϕ , el coeficiente de fricción μ , la tensión de corte τ , la deformación cortante γ en el plano de corte, la velocidad de la viruta V_c y la velocidad de corte V_s , así como las energías u_f , u_s y u_t .

21.66 Estime las temperaturas de corte apropiadas para las condiciones del problema 21.65 si se aplican las siguientes propiedades:

	Material de la pieza de trabajo	
	Aluminio	Acero
Energía de corte, μ , N-mm/mm ³	1320	2740
Difusividad térmica, K , mm ² /s	97	14
Calor específico volumétrico, ρc , N/mm ² °C	2.6	3.3

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

21.68 La vida de la herramienta se incrementa mucho cuando se implementa un medio efectivo de enfriamiento y lubricación. Diseñe métodos de distribución de fluido a la zona de corte y analice las ventajas y limitaciones de sus diseños.

21.69 Diseñe un planteamiento experimental con el que pueda simularse un corte ortogonal en una operación de cilindrado en un torno.

21.70 Diga lo que usted piensa acerca de si las virutas producidas durante el maquinado pueden usarse para fabricar productos útiles. Proporcione algunos ejemplos de posibles productos y comente sus características y diferencias si fueran fabricados con otros procesos de manufactura. Para ese propósito, ¿qué tipos de virutas serían deseables?

21.71 Recuerde que las herramientas de corte pueden diseñarse de modo que la longitud del contacto herramienta-viruta se reduzca por el retiro de la superficie de ataque de la herramienta a cierta distancia desde su punta. Explique las posibles ventajas de tener una herramienta así.

21.72 Recuerde que el mecanismo de formación de virutas se puede observar si se raspa la superficie de una barra de mantequilla con un cuchillo afilado. Efectúe dicho experimento con mantequilla a distintas temperaturas, inclusive congelada. Mantenga constante la profundidad de corte y coloque el cuchillo a diferentes ángulos (para simular el ángulo de ataque de la herramienta), incluso raspando en forma oblicua. Describa sus observaciones en relación con el tipo de virutas producidas. También comente si observa cualquier movimiento cuando la mantequilla está muy fría.

21.73 Ciertos experimentos han demostrado que es posible producir virutas delgadas y anchas con espesor de 0.08 mm

21.67 Suponga que usted es un profesor que estudia los temas vistos en este capítulo y aplica un cuestionario sobre los aspectos numéricos para someter a prueba los conocimientos de sus estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

(0.003 pulg) y 10 mm (4 pulg) de ancho, lo que sería similar a las dimensiones de una película transparente. Los materiales de los experimentos han sido aluminio, magnesio y acero inoxidable. Un experimento típico sería similar al corte ortogonal maquinando la periferia de una barra sólida y redonda con una herramienta recta que se desplace en forma radial hacia dentro. Expresé lo que usted piensa acerca de producir películas metálicas delgadas por medio de este método, tenga en cuenta las características y propiedades de la superficie del metal.

21.74 ¿Qué piensa usted con respecto a reciclar las virutas producidas durante el maquinado en una planta? Considere las virutas producidas con corte seco en comparación con las obtenidas al maquinar con un fluido de corte.

21.75 Haga una lista de los productos que se puedan elaborar directamente con virutas o rasurados metálicos.

21.76 Obtenga un cepillo para madera y algunas muestras de madera. Demuestre que las virutas producidas dependen de la dirección de corte con respecto del grano de la madera. Explique por qué sucede esto.

21.77 Se ha observado que las virutas de ciertos aceros al carbono son notablemente magnéticas, aun cuando la pieza de origen no lo sea. Investigue las razones de este efecto y escriba un documento de una página que explique la importancia de los mecanismos.

21.78 Como hemos visto, las virutas eliminan la mayor parte del calor que se genera durante el maquinado. Si no tuvieran esta capacidad, ¿qué sugerencias haría usted con objeto de realizar procesos de maquinado sin que se generara un calor excesivo? Explique su respuesta.

22

Materiales para la herramienta de corte y fluidos de corte

22.1	Introducción	600
22.2	Aceros de alta velocidad	604
22.3	Aleaciones fundidas de cobalto	605
22.4	Carburos	605
22.5	Herramientas recubiertas	609
22.6	Cerámicos base alúmina	612
22.7	Nitruro de boro cúbico	613
22.8	Cerámicos con base en nitruro de silicio	614
22.9	Diamante	614
22.10	Materiales y nanomateriales reforzados con triquitas	615
22.11	Costos y reacondicionamiento de herramientas	616
22.12	Fluidos de corte	616

EJEMPLO:

22.1	Efectos de los fluidos de corte en el maquinado	617
------	---	-----

- En continuación de la cobertura de los fundamentos del maquinado presentados en el capítulo anterior, éste describe dos elementos esenciales en las operaciones de maquinado: los materiales para la herramienta de corte y los fluidos de corte.
- El capítulo abre con un análisis de los tipos y las características de los materiales para las herramientas de corte, incluyendo aceros de alta velocidad, carburos, cerámicos, nitruro de boro cúbico, diamante y herramientas con recubrimiento.
- Después se describen los tipos de fluidos de corte de uso común, sus funciones y la forma en que afectan la operación de maquinado.
- También se describen las tendencias para el maquinado casi seco y seco, los métodos para aplicar el fluido de corte, y se explica su significado con respecto a las operaciones de maquinado amigables con el ambiente.

22.1 Introducción

La selección de los materiales para herramientas de corte destinadas a una aplicación en particular se cuenta entre los factores más importantes de las operaciones de maquinado. Este capítulo describe las propiedades relevantes y las características de desempeño de los principales tipos de materiales para herramientas de corte como una guía para la selección de éstos. Sin embargo, debido a lo complejo de su naturaleza, el tema no se presta con facilidad a la determinación precisa de los materiales apropiados para una herramienta de una aplicación en particular. En consecuencia, a lo largo de los años se han establecido en la industria lineamientos y recomendaciones generales. Al inicio del capítulo 23 se presenta información más detallada sobre las recomendaciones de materiales específicos para elaborar piezas de trabajo y sus operaciones de maquinado.

Tal como se dijo en el capítulo anterior, la herramienta de corte está sujeta a (a) temperaturas elevadas, (b) grandes esfuerzos de contacto y (c) fricción en la interfase herramienta-viruta y en la superficie maquinada. En consecuencia, el material de la herramienta de corte debe poseer las siguientes características:

- **Dureza en caliente** de modo que se mantengan la dureza, la resistencia y la resistencia al desgaste de la herramienta aun con las temperaturas que se generan en las operaciones de maquinado. Esta propiedad garantiza que la herramienta no sufra deformación plástica y, de esa manera, conserve su forma y filo. La dureza del material de la herramienta es función de la temperatura, como se aprecia en la figura 22.1; observe la amplia respuesta de estos materiales, lo rápido que las herramientas de acero al carbono pierden su dureza (esto significa que no se pueden usar para muchas operaciones) y lo bien que los cerámicos mantienen la suya a temperaturas elevadas. Era común usar aceros al carbono (sección 5.7) como materiales para la herramienta

hasta que se desarrollaron aceros de alta velocidad a principios de la década de 1900; el término alta velocidad significa que las velocidades de maquinado pueden ser altas, lo cual incrementa la productividad.

- **Tenacidad y resistencia al impacto** (resistencia al choque mecánico, sección 2.9) de modo que las fuerzas de impacto que sufre la herramienta repetidamente en operaciones de corte interrumpidas (como en el fresado o en el torneado de un eje estriado), o las fuerzas debidas a la vibración y al traqueteo durante el maquinado, no la astillen o fracturen.
- **Resistencia al choque térmico** para soportar el cambio rápido de temperatura (sección 3.6) que ocurre en el corte interrumpido.
- **Resistencia al desgaste** (sección 33.5) de modo que se obtenga una vida aceptable para la herramienta antes de que sea necesario reemplazarla.
- **Estabilidad química y ser inerte (inertidad)** al material de la pieza de trabajo para evitar o minimizar cualesquiera reacciones adversas, adhesión y difusión del astillado de la herramienta que contribuiría a su desgaste.

Para responder a estos requerimientos tan demandantes, con los años se han desarrollado varios materiales para la herramienta de corte, con un rango amplio de propiedades mecánicas, físicas y químicas, como se aprecia en la tabla 22.1. Las propiedades listadas en la primera columna de esta tabla son útiles para determinar las características deseables del material para la herramienta en una aplicación en particular. Por ejemplo:

- La dureza y resistencia son importantes con respecto a las propiedades mecánicas del material de la pieza de trabajo por maquinarse.
- La resistencia al impacto es importante cuando se hacen cortes interrumpidos en el maquinado, como en el fresado.
- La temperatura de fusión del material de la herramienta es importante, en especial cuando se compara con las temperaturas generadas en la zona de corte.
- La conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica son importantes para determinar la resistencia de los materiales de la herramienta a los efectos de fatiga y choque térmico.

Deberá reconocerse que el material seleccionado para la herramienta quizá no tenga *todas* las propiedades deseables en una operación de maquinado específica. Esta situación se aprecia rápidamente en la tabla 22.2, al observar las direcciones opuestas de las largas flechas horizontales que muestran las tendencias. Por ejemplo, obsérvese que (a) los aceros de alta velocidad son tenaces, pero tienen una limitada dureza en caliente, y (b) los cerámicos tienen alta resistencia a la temperatura y el desgaste, pero son frágiles y se astillan con facilidad. También observe cómo se incrementa el costo de las herramientas a partir de los aceros de alta velocidad hasta el diamante.

En la tabla 22.3 se muestran las características de operación de los materiales para herramientas, listados en el orden en que se desarrollaron e implementaron en la industria. Observe que muchos de estos materiales también se utilizan para hacer dados y moldes en fundición, formado y otros procesos para dar forma a los materiales metálicos y no metálicos.

1. Aceros de alta velocidad.
2. Aleaciones fundidas de cobalto.
3. Carburos.

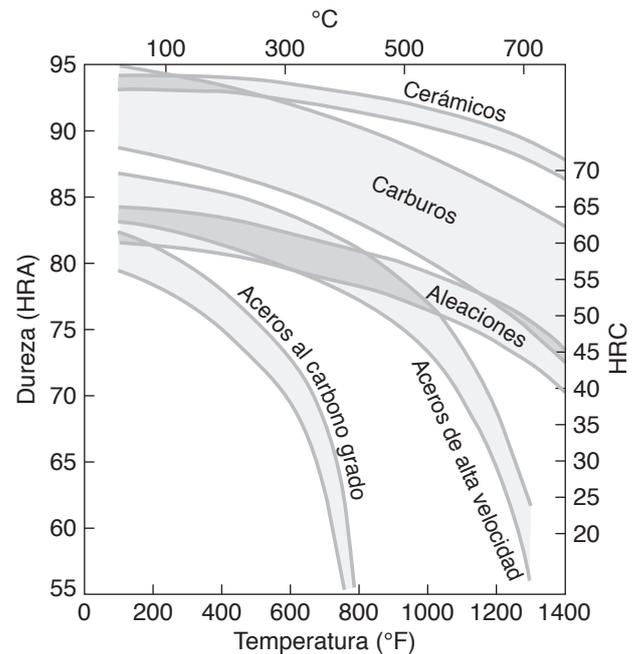


FIGURA 22.1 Dureza de diferentes materiales para la herramienta de corte en función de la temperatura (dureza en caliente); el amplio rango en cada grupo de materiales se debe a las distintas composiciones y tratamientos disponibles para el grupo en cuestión.

TABLA 22.1

Características generales de los materiales para herramientas							
Propiedad	Aceros de alta velocidad	Aleaciones fundidas de cobalto	Carburos		Cerámicos	Nitruro de boro cúbico	Diamante de un solo cristal*
			WC	TiC			
Dureza	83-86 HRA	82-84 HRS 46-62 HRC	90-95 HRA 1800-2400 HK	91-93 HRA 1800-3200 HK	91-95 HRA 2000-3000 HK	4000-5000 HK	7000-8000 HK
Resistencia a la compresión, MPa psi × 10 ³	4100-4500 600-650	1500-2300 220-335	4100-5850 600-850	3100-3850 450-560	2750-4500 400-650	6900 1000	6900 1000
Resistencia a la ruptura transversal, MPa psi × 10 ³	2400-4800 350-700	1380-2050 200-300	1050-2600 150-375	1380-1900 200-275	345-950 50-135	700 105	1350 200
Resistencia al impacto, J pulg-lb	1.35-8 12-70	0.34-1.25 3-11	0.34-1.35 3-12	0.79-1.24 7-11	<0.1 <1	<0.5 <5	<0.2 <2
Módulo de elasticidad, GPa psi × 10 ⁶	200 30	— —	520-690 75-100	310-450 45-65	310-410 45-60	850 125	820-1050 120-150
Densidad, kg/m ³ lb/pulg ³	8600 0.31	8000-8700 0.29-0.31	10,000-15,000 0.36-0.54	5500-5800 0.2-0.22	4000-4500 0.14-0.16	3500 0.13	3500 0.13
Volumen de fase dura, %	7-15	10-20	70-90	—	100	95	95
Temperatura de fusión o descomposición, °C °F	1300 2370	— —	1400 2550	1400 2550	2000 3600	1300 2400	700 1300
Conductividad térmica, W/m-K	30-50	—	42-125	17	29	13	5000-2000
Coefficiente de expansión térmica, × 10 ⁻⁶ /°C	12	—	4-6.5	7.5-9	6-8.5	4.8	1.5-4.8

* Los valores para el diamante policristalino por lo general son más bajos excepto para la resistencia al impacto, que es mayor.

TABLA 22.2

Características generales de los materiales para herramientas de corte (estos materiales tienen un amplio rango de composiciones y propiedades; en muchas categorías existen características que se traslapan)							
	Aceros de alta velocidad	Aleaciones fundidas de cobalto	Carburos sin recubrimiento	Carburos con recubrimiento	Cerámicos	Nitruro de boro cúbico policristalino	Diamante
Dureza en caliente	→						
Tenacidad	←						
Resistencia al impacto	←						
Resistencia al desgaste	→						
Resistencia al astillado	←						
Velocidad de corte	→						
Resistencia al choque térmico	←						
Costo del material para la herramienta	→						
Profundidad del corte	Ligera a pesada	Ligera a pesada	Ligera a pesada	Ligera a pesada	Ligera a pesada	Ligera a pesada	Muy ligera para diamante de un solo cristal
Método de procesamiento	Forjado, fundido, sinterizado PIC*	Fundido y sinterizado PIC	Prensado y sinterizado en frío	DQV o DFV**	Prensado y sinterizado en frío o sinterizado PIC	Sinterizado de alta presión y alta temperatura	Sinterizado de alta presión y alta temperatura

Fuente: Tomado de R. Komanduri.

* Prensado isostático en caliente (HIP, por sus siglas en inglés, las cuales encontrará el lector en el capítulo 17).

** Deposición química por vapor (o CVD, por sus siglas en inglés), deposición física por vapor (o PVD, por sus siglas en inglés).

TABLA 22.3

Características generales de operación de los materiales para la herramienta de corte			
Materiales para la herramienta	Características generales	Modos de desgaste o falla de la herramienta	Limitaciones
Aceros de alta velocidad	Tenacidad elevada, resistencia a la fractura, amplio rango para desbastado y acabado, buenos para cortes interrumpidos.	Desgaste en el flanco, desgaste de cráter.	Baja dureza en caliente, endurecimiento limitado y resistencia limitada al desgaste.
Carburos sin recubrimiento	Dureza elevada en un amplio rango de temperaturas, tenacidad, resistencia al desgaste, versátiles, amplio rango de aplicaciones.	Desgaste en el flanco, desgaste de cráter.	No se pueden utilizar a bajas velocidades debido a la fusión en frío de las virutas y al microastillado.
Carburos con recubrimiento	Mayor resistencia al desgaste que la de los carburos sin recubrimiento, mejores propiedades térmicas y de fricción.	Desgaste en el flanco, desgaste de cráter.	No se pueden usar a bajas velocidades debido a la fusión en frío de las virutas y al microastillado.
Cerámicos	Dureza elevada a altas temperaturas, gran resistencia al desgaste por abrasión.	Muecas en la línea de profundidad de corte, microastillado, fractura severa.	Baja resistencia y baja resistencia a la fatiga termomecánica.
Nitruro de boro cúbico policristalino (BNc)	Elevada dureza en caliente, tenacidad, resistencia del filo.	Muecas en la línea de profundidad de corte, astillado, oxidación, grafitización.	Baja resistencia y menor estabilidad química que la de los cerámicos a alta temperatura.
Diamante	Alta dureza y tenacidad, resistencia al desgaste por abrasión.	Astillado, oxidación, grafitización.	Baja resistencia y menor estabilidad química a altas temperaturas.

Fuente: Tomado de R. Komanduri y otras fuentes.

4. Herramientas con recubrimiento.
5. Cerámicos base alúmina.
6. Nitruro de boro cúbico.
7. Cerámicos con base en nitruro de silicio.
8. Diamante.
9. Materiales y nanomateriales reforzados con triquitas.

Los aceros al carbono son los materiales más antiguos utilizados para fabricar herramientas y se han usado ampliamente desde la década de 1880 para hacer brocas, punzones, fresas y rimas. Los aceros de baja y media aleación se desarrollaron en una época posterior para aplicaciones similares, pero con una vida más larga de la herramienta. Aunque no son caros y se les da forma y afilado con facilidad, estos aceros no tienen suficiente dureza en caliente ni resistencia al desgaste para el maquinado a altas velocidades, en el que la temperatura aumenta en forma significativa. Su uso está limitado a operaciones de corte a muy baja velocidad, en particular en el trabajo de la madera, por lo que no tienen un significado particular en las operaciones modernas de maquinado.

En este capítulo se describen los siguientes temas:

- Las características, aplicaciones y limitaciones de los materiales para la herramienta de corte, incluyendo las características y costos requeridos.
- El rango aplicable de las variables de proceso para un rendimiento óptimo.
- Los tipos y características de los fluidos de corte y sus aplicaciones específicas en una amplia variedad de operaciones de maquinado.

22.2 Aceros de alta velocidad

Las *herramientas de acero de alta velocidad* (HSS, por sus siglas en inglés) reciben este nombre debido a que se desarrollaron para maquinar a velocidades mayores de lo que antes era posible. Se produjeron por primera vez a principios de la década de 1900 y son los aceros con mayor grado de aleación de los usados para herramientas (sección 5.7). Se pueden endurecer a varias profundidades, tienen buena resistencia al desgaste y son relativamente baratos. Debido a su tenacidad y a su alta resistencia a la fractura asociada, los aceros de alta velocidad son apropiados especialmente para (a) herramientas con ángulo de ataque positivo alto, (b) cortes interrumpidos, (c) máquinas herramientas con poca rigidez sujetas a vibración y traqueteo y (d) herramientas complejas, como brocas, rimas, machuelos y cortadores de engranes. Su limitación más importante, debido a su poca dureza en caliente, es que las velocidades de corte son bajas en comparación con las de herramientas de carburo, como puede verse en la figura 22.1.

Hay dos tipos básicos de aceros de alta velocidad: **molibdeno** (serie M) y **tungsteno** (serie T). La serie M contiene hasta cerca de 10% de Mo, con Cr, V, W y Co como elementos de aleación. La serie T contiene de 12 a 18% de W, con Cr, V y Co como elementos de aleación. Los carburos formados en el acero constituyen alrededor de 10 a 20% del volumen. La serie M tiene por lo general mayor resistencia a la abrasión que la serie T, sufre menos distorsión durante el tratamiento térmico (sección 4.7) y es menos cara. En consecuencia, el 95% de todas las herramientas de acero de alta velocidad están elaboradas con aceros de la serie M. En la tabla 5.6 se listan tres de estos aceros y sus características.

Las herramientas de acero de alta velocidad están disponibles en forma de forja (roladas o forjadas), fundidas y sinterizadas (matalurgia de polvos). Pueden ser **recubiertas** para mejorar su rendimiento, tal y como se describe en la sección 22.5. Las herramientas de acero de alta velocidad también pueden ser sujetas a *tratamientos superficiales* (como en el caso de endurecimiento para mejorar su dureza y resistencia al desgaste; vea la sección 4.10) o tratamiento con vapor a temperaturas elevadas con el fin de desarrollar una capa dura de óxido negro (*azulado*) para aumentar su rendimiento, con una baja tendencia a la formación de borde acumulado.

Los principales elementos de aleación de los aceros de alta velocidad son cromo, vanadio, tungsteno, cobalto y molibdeno. Para apreciar su papel en las herramientas de corte, consulte la tabla 5.2 acerca de los efectos de varios elementos presentes en los aceros y observe lo siguiente:

- El cromo mejora la tenacidad, la resistencia al desgaste y la resistencia a las altas temperaturas.
- El vanadio mejora la tenacidad, la resistencia a la abrasión y la dureza en caliente.
- El tungsteno y el cobalto tienen efectos similares, es decir, mayor resistencia y dureza en caliente.
- El molibdeno mejora la resistencia al desgaste, la tenacidad y la resistencia y dureza a altas temperaturas.

22.3 Aleaciones fundidas de cobalto

Introducidas en 1915, las *aleaciones fundidas de cobalto* tienen los siguientes rangos de composición: 38 a 53% de Co, 30 a 33% de Cr y 10 a 20% de W. Debido a su gran dureza, por lo común de 58 a 64 HRC, tienen buena resistencia al desgaste y pueden mantener su dureza a temperaturas elevadas. No son tan tenaces como los aceros de alta velocidad y son sensibles a las fuerzas de impactos; en consecuencia, son menos apropiadas que los aceros de alta velocidad para operaciones de corte interrumpido. Conocidas comúnmente como herramientas *Estelita*, estas aleaciones son fundidas y elaboradas en formas relativamente simples. Ahora sólo se les usa para aplicaciones especiales que involucran *desbastes profundos* y continuos con alimentaciones y velocidades relativamente altas, tan altas como lo doble de las tasas que son posibles con aceros de alta velocidad.

22.4 Carburos

Los dos grupos de materiales para herramientas que se acaban de describir poseen la tenacidad, resistencia al impacto y resistencia al choque térmico que se requieren, pero también tienen limitaciones importantes, en particular con respecto a la resistencia y dureza en caliente. En consecuencia, no pueden ser usados con eficacia cuando se requieren altas velocidades de corte y, por lo tanto, altas temperaturas; dichas velocidades con frecuencia son necesarias para mejorar la productividad en planta.

Para afrontar el reto de las cada vez mayores velocidades de corte, en la década de 1930 se introdujeron los *carburos*, también conocidos como *carburos cementados* o *sinterizados*. Debido a su gran dureza en un amplio rango de temperaturas (figura 22.1), elevado módulo de elasticidad, alta conductividad térmica y poca expansión térmica, los carburos están entre los materiales más importantes, versátiles y eficaces en cuanto a costo para herramientas y dados en un amplio rango de aplicaciones. Los dos grupos principales de carburos utilizados para maquinar son el *carburo de tungsteno* y el *carburo de titanio*. Con objeto de diferenciarlas de las herramientas recubiertas descritas en la sección 22.5, a las herramientas que contienen sólo carburo por lo general se les conoce como *carburos sin recubrimiento*.

22.4.1 Carburo de tungsteno

El *carburo de tungsteno* (WC), por lo general, consiste en partículas de carburo de tungsteno embebidas en una matriz de cobalto. Estas herramientas se manufacturan con técnicas de metalurgia de polvos, de ahí el término *carburos sinterizados* o *carburos cementados*, como se describió en el capítulo 17. Las partículas de carburo de tungsteno primero se combinan con cobalto, lo que da como resultado un material compuesto con una matriz de cobalto que rodea las partículas de carburo. Estas partículas, con un tamaño de entre 1 a 5 μm (40 a 200 μpulg), se comprimen y sinterizan en las formas deseadas para el *inserto* (vea la sección 22.4.3 y la figura 22.2). Con frecuencia, los carburos de tungsteno



FIGURA 22.2 Insertos comunes de carburos con formas varias y diferentes rompevirutas; también existen insertos redondos, como puede verse en las figuras 22.3c y 22.4. En los insertos, los barrenos están estandarizados para que sean intercambiables en los vástagos de la herramienta. *Fuente:* Cortesía de Kennametal Inc.



Código QR 22.1 Producción de insertos (*Fuente:* Cortesía de Sandvik Coromant).

también están compuestos con *carburo de titanio* y *carburo de niobio* para darle propiedades especiales al material.

La cantidad de cobalto presente, que por lo general va de 6 a 16%, afecta significativamente las propiedades de las herramientas de carburo de tungsteno. A medida que se incrementa el contenido de cobalto disminuye la resistencia, dureza y resistencia al desgaste del WC, mientras que aumenta su tenacidad debido a que el cobalto es más tenaz. Las herramientas de carburo de tungsteno se usan, por lo general, para cortar aceros, hierro fundido y materiales no ferrosos abrasivos y han reemplazado en gran medida a los aceros de alta velocidad debido a su mejor rendimiento.

Carburos de micrograno. Las herramientas de corte se fabrican también a partir de carburos microscópicos y ultrafinos (*microgranos*), incluyendo carburo de tungsteno, de titanio y tantalio. Es común que el tamaño del grano esté en el rango de 0.2 a 0.8 μm (de 8 a 30 μpulg). En comparación con los carburos tradicionales, descritos previamente, estos materiales para herramientas son más fuertes, duros y resistentes al desgaste, lo que mejora la productividad. En una aplicación, microbrocas con diámetros del orden de 100 μm (0.004 pulg) se fabrican con carburos de micrograno y se usan en la fabricación de tarjetas de circuitos.

Carburos graduados funcionalmente. En estas herramientas, la composición del carburo en el inserto tiene un *gradiente* a través de su profundidad cercana a la superficie, en lugar de ser uniforme como en los insertos comunes de carburo. El gradiente tiene una distribución suave de composiciones y fases, con funciones similares a las descritas como propiedades deseables de los recubrimientos en las herramientas de corte. Las propiedades mecánicas graduadas eliminan las concentraciones de esfuerzos y aumentan la vida y el rendimiento de la herramienta; sin embargo, son más caras y no se justifican para todas las aplicaciones.

22.4.2 Carburo de titanio

El *carburo de titanio* (TiC) consiste en una matriz de níquel-molibdeno. Tiene una resistencia al desgaste mayor que la del carburo de tungsteno pero no es tan tenaz. El carburo de titanio es apropiado para maquinarse materiales duros, sobre todo aceros y hierros fundidos, y para maquinarse a velocidades mayores de las que son apropiadas para el carburo de tungsteno.

22.4.3 Insertos

Aunque en las fábricas, por lo general, se dispone de un conjunto de herramientas afiladas o vueltas a afilar, las operaciones de cambio de éstas pueden consumir tiempo y por ello ser ineficientes. La necesidad de un método más efectivo ha llevado al desarrollo de *insertos*, que son herramientas de corte individuales con varios puntos de corte (figura 22.2). Así, un inserto cuadrado tiene ocho puntos de corte y uno triangular tiene seis. Los insertos generalmente se fijan en el *portaherramienta* que incluye varios mecanismos de bloqueo (figura 22.3); cuando un filo del inserto se desgasta, es *indexado* (se gira en el portaherramienta) para dejar disponible otro filo de corte. Además de los

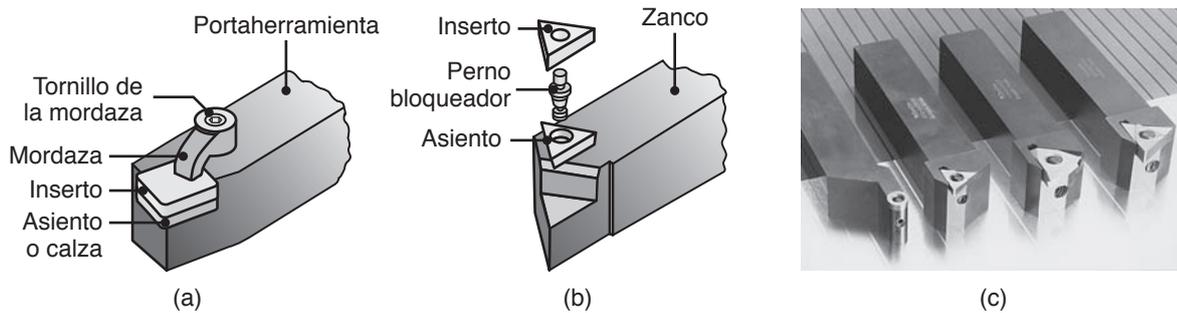


FIGURA 22.3 Métodos de montaje de insertos en portaherramienta: (a) mordaza y (b) perno bloqueador de alas. (c) Ejemplos de insertos montados con pernos sin rosca que se aseguran con tornillos laterales. Fuente: Cortesía de Valenite.

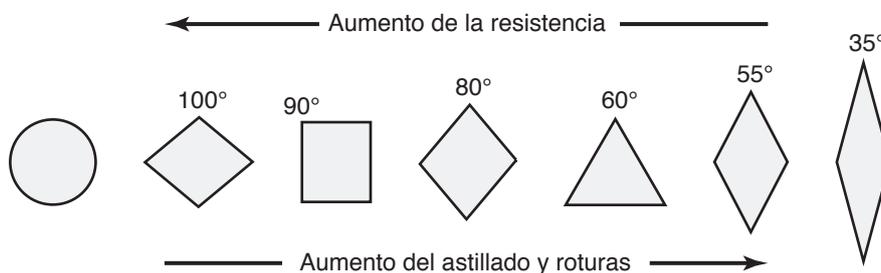


FIGURA 22.4 Resistencia relativa en el borde y tendencia a astillarse de insertos de diferentes formas; la resistencia se refiere al filo del cortador indicado por los ángulos incluidos. Fuente: Cortesía de Kennametal Inc.

ejemplos mostrados en esta figura, se dispone de una amplia variedad de portaherramientas para aplicaciones específicas, incluyendo aquellos con características de inserción y remoción rápida.

Los insertos de carburo están disponibles en varias formas, como cuadrados, triángulos, de diamante y redondos. La resistencia del filo del cortador de un inserto depende de su forma; entre más pequeño sea el ángulo incluido (vea la parte superior de la figura 22.4), menor es la resistencia del borde. Con el fin de mejorar más la resistencia del borde y prevenir el astillado, los bordes de los insertos por lo general son pulidos, biselados o producidos con una base negativa (figura 22.5). La mayoría de los insertos se pulen a un radio de alrededor de 0.025 mm (0.001 pulg).

Las características de **romper virutas** (vea la figura 21.7 y la sección 21.2.1) de los insertos son con fines de (a) controlar el flujo de la viruta durante el maquinado, (b) eliminar las virutas largas, (c) reducir el calor generado y (d) disminuir la tendencia a la vibración y al traqueteo. Existen insertos de carburo comerciales con una amplia variedad de características rompevirutas, en la figura 22.2 se muestran ejemplos comunes de ellas. La selección de una característica particular para romper virutas depende de la alimentación y la profundidad del corte de la operación, del material de la pieza de trabajo, del tipo de viruta producido durante el corte y de si se trata de una operación de maquinado burdo o de acabado. Las geometrías óptimas de la ruptura de virutas se desarrollan por medio de diseño asistido por computadora y técnicas de análisis del elemento finito.

La **rigidez** de la máquina herramienta (sección 25.3) es de gran importancia en el uso de herramientas de carburo. Alimentaciones ligeras, bajas velocidades y el tra-

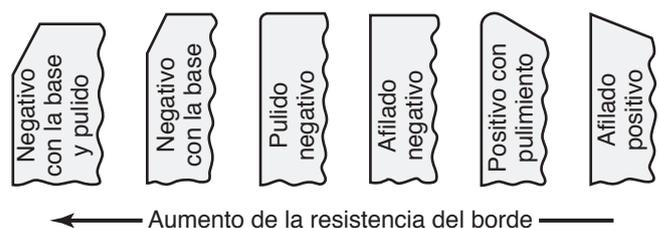


FIGURA 22.5 Preparación del borde para insertos con el fin de mejorar la resistencia del borde. Fuente: Cortesía de Kennametal Inc.

queteo son perjudiciales ya que tienden a dañar el filo del cortador de la herramienta. Por ejemplo, las alimentaciones ligeras concentran las fuerzas y la temperatura cerca de los bordes de la herramienta y aumentan la tendencia de los bordes a astillarse.

22.4.4 Clasificación de los carburos

Los grados de las herramientas de carburo se clasifican con las letras P, M, K, N, S y H (como se muestra en las tablas 22.4 y 22.5) para un rango de aplicaciones, incluyendo los grados C tradicionales usados en Estados Unidos. Debido a la gran variedad de composiciones de carburo disponibles, al amplio rango de aplicaciones de maquinado y a diversos materiales de la pieza de trabajo involucrados, los esfuerzos de ISO para clasificarlos son una tarea difícil.

TABLA 22.4

Clasificación ISO de herramientas de corte hechas de carburo de acuerdo con su uso				
Símbolo	Material de la pieza de trabajo	Código de color	Designación en orden ascendente para la resistencia al desgaste y en orden descendente para la tenacidad en cada categoría (en incrementos de 5)	
			No recubierto	Recubierto
P	Metales ferrosos con virutas largas	Azul	P01, P05-P20	P20-P50
M	Aceros inoxidables con virutas largas o cortas	Amarillo	M10-M20	M20-M40
K	Hierro fundido con virutas cortas	Rojo	K05-K20	K05-K30
N	Metales no ferrosos	Verde	N10-20	N05-N30
S	Aleaciones de alta temperatura	Naranja	S10-20	S20-S30
H	Materiales endurecidos	Gris	—	H10

TABLA 22.5

Clasificación de carburos de tungsteno de acuerdo con las operaciones de maquinado requeridas						
Estándar ISO	Número de clasificación (grado) ANSI	Materiales por maquinar	Operación de maquinado	Tipo de carburo	Características del	
					Corte	Carburo
K30–K40	C1	Hierro fundido, metales no ferrosos y materiales no metálicos que requieren resistencia a la abrasión.	Desbaste	Grados resistentes al desgaste; por lo general WC-Co con tamaños variables de grano.	Incremento de velocidad de corte ↓ ↑	Aumento de la dureza y resistencia al desgaste ↓ ↑
K20	C2		Propósito general			
K10	C3		Acabado ligero			
K01	C4		Acabado de precisión			
P30–P50	C5	Aceros que requieren resistencia a la deformación por cráter y de otro tipo.	Desbaste	Grados resistentes al cráter; distintas composiciones WT-Co, con aleaciones TiC o TaC.	Incremento de velocidad de corte ↓ ↑	Aumento de la dureza y resistencia al desgaste ↓ ↑
P20	C6		Propósito general			
P10	C7		Acabado ligero			
P01	C8		Acabado de precisión			

Nota: Las comparaciones entre ISO y ANSI son aproximadas.

22.5 Herramientas recubiertas

Como se explicó en la parte I, continuamente se desarrollan nuevas aleaciones metálicas y materiales de ingeniería, en particular desde la década de 1960. Estos materiales tienen mucha resistencia y tenacidad, pero en general son abrasivos y químicamente reactivos con los materiales de la herramienta. La dificultad de maquinarse estos materiales con eficiencia y la necesidad de mejorar su rendimiento ha conducido a desarrollos importantes *herramientas recubiertas*. En comparación con los materiales de la herramienta en sí, los recubrimientos tienen propiedades ventajosas como las siguientes:

- Menos fricción.
- Mayor resistencia al desgaste y a las fracturas.
- Mayor dureza en caliente y resistencia al impacto.
- Actúan como una barrera para la difusión entre la herramienta y las virutas.

Las herramientas recubiertas pueden durar 10 veces más que las no recubiertas, esto permite mayores velocidades de corte y la reducción tanto del tiempo requerido para las operaciones de maquinado como de los costos de producción. Como puede verse en la figura 22.6, el tiempo de maquinado se ha reducido en forma sostenida en un factor de más de 100 desde el año de 1900. Esta mejoría ha tenido un efecto enorme en la economía de las operaciones de maquinado, junto con mejoras continuas en el diseño y la construcción de las modernas máquinas herramientas y sus controles computarizados (vea el capítulo 25 y la parte IX). Como resultado, las herramientas recubiertas se utilizan ahora hasta en el 80% de todas las operaciones de maquinado, particularmente en las de torneado, fresado y **barrenado**.

22.5.1 Materiales de recubrimiento y métodos de recubrimiento

Los materiales comunes usados para los recubrimientos son *nitruro de titanio* (TiN), *carburo de titanio* (TiC), *carbonitruro de titanio* (TiCN) y *óxido de aluminio* (Al_2O_3). Estos recubrimientos, cuyo espesor común está en el rango de 2 a 15 μm (80 a 600 $\mu pulg$), se

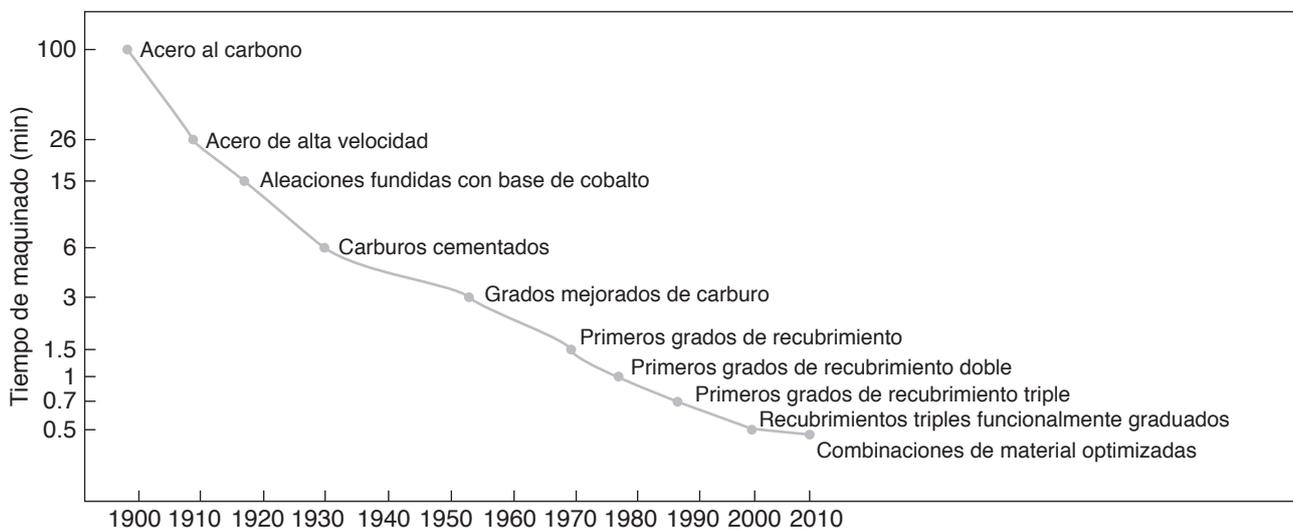


FIGURA 22.6 Tiempo relativo requerido para maquinarse con diferentes materiales de la herramienta de corte, indicando el año en que se introdujeron por primera vez; observe que en 100 años el tiempo de maquinado se ha reducido en dos órdenes de magnitud. *Fuente:* Cortesía de Sandvik.

aplican en herramientas de corte e insertos por medio de dos técnicas principales que se describen con mayor detalle en la sección 34.6:

1. **Deposición química por vapor (CVD, por sus siglas en inglés), incluye deposición química por vapor asistida con plasma.**
2. **Deposición física por vapor (PVD, por sus siglas en inglés).**

El proceso de CVD es el método más comúnmente usado para herramientas de carburo con recubrimientos multifásicos y cerámicos, los cuales se describen más adelante en esta sección. Sin embargo, los carburos con recubrimiento PVD recubiertos de TiN tienen una resistencia mayor del filo, menor fricción y una tendencia más baja a formar un borde acumulado en el cortador, además los recubrimientos son más suaves y uniformes en su espesor, el cual generalmente está en el rango de 2 a 4 μm (80 a 160 μpulg). Otra tecnología, usada en particular para recubrimientos multifásicos, es la **deposición química por vapor de temperatura media (MTCVD)** desarrollada para maquinado de hierro dúctil (nodular) y aceros inoxidables y para dar mayor resistencia a la propagación de fracturas de la que tienen los recubrimientos de deposición química por vapor.

Los recubrimientos para herramientas de corte y dados deben tener las siguientes características generales:

- **Dureza elevada** a altas temperaturas para resistir el desgaste.
- **Estabilidad química** y ser **inertes** con respecto al material de la pieza de trabajo con objeto de reducir el desgaste.
- **Baja conductividad térmica** para impedir aumentos de temperatura en el sustrato.
- **Compatibilidad y buena adherencia** para evitar que se descascaren o desprendan del sustrato, que puede ser carburo o acero de alta velocidad.
- **Poca o ninguna porosidad** para mantener su integridad y resistencia.

La eficacia de los recubrimientos se mejora por medio de la dureza, tenacidad y alta conductividad térmica del sustrato. El pulido (sección 26.7) de los bordes cortadores es un procedimiento importante para el mantenimiento de la resistencia del sustrato; de otro modo, el recubrimiento puede descascararse o astillarse en los bordes y esquinas afiladas.

Recubrimientos de nitruro de titanio. Los recubrimientos de nitruro de titanio tienen coeficientes de fricción bajos, mucha dureza, resistencia a la alta temperatura y buena adherencia al sustrato. En consecuencia, mejoran mucho la vida de las herramientas de acero de alta velocidad y la de aquellas hechas con carburo, brocas y cortadores. Las herramientas recubiertas con nitruro de titanio (de color dorado) tienen buen desempeño a altas velocidades de corte y alimentaciones. El desgaste en el flanco es significativamente menor que el de las herramientas no recubiertas (figura 22.7) y las superficies del flanco se pueden aplanar después del uso, ya que esmerilar la cara del flanco no desprende el recubrimiento en la cara de barrido de la herramienta. Sin embargo, estas herramientas recubiertas no tienen buen desempeño a bajas velocidades de corte debido a que el recubrimiento puede desprenderse por adhesión de la viruta, de ahí que sea importante el uso de fluidos de corte apropiados para minimizar la adhesión.

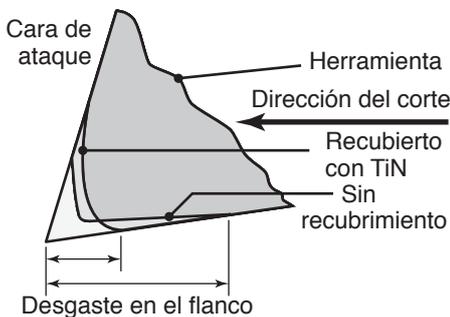


FIGURA 22.7 Ilustración esquemática de patrones comunes de desgaste en herramientas de acero de alta velocidad sin recubrimiento y con recubrimiento de nitruro de titanio; observe que el desgaste en el flanco es significativamente menor en la herramienta recubierta.

Recubrimientos de carburo de titanio. Los recubrimientos de carburo de titanio en insertos de carburo de tungsteno tienen una resistencia mayor al desgaste en el flanco al maquinado de materiales abrasivos.

Recubrimientos cerámicos. Debido a que son inertes químicamente, tienen baja conductividad térmica, resistencia a la alta temperatura y resistencia al desgaste en el flanco y por crater, los cerámicos son apropiados como materiales para recubrimiento de herramientas de corte. El recubrimiento cerámico de uso más común es el **óxido de aluminio** (Al_2O_3). Sin embargo,

debido a que son muy estables (no son químicamente reactivos), los recubrimientos de óxido por lo general se adhieren débilmente al sustrato.

Recubrimientos multifásicos. Las propiedades deseables que se acaban de describir para los recubrimientos se pueden combinar y optimizar con el uso de *recubrimientos multifásicos*. Están disponibles herramientas de carburo con dos o más capas de recubrimiento y son particularmente eficaces para maquinarse hierros fundidos y aceros. Por ejemplo, primero se puede depositar TiC sobre el sustrato, seguido de Al_2O_3 , y después TiN. La primera capa debe adherirse bien al sustrato, la capa externa debe resistir el desgaste y tener baja conductividad térmica, y la capa intermedia debe adherirse bien y ser compatible con ambas capas.

Las aplicaciones comunes de las herramientas con capas múltiples son las siguientes:

- Corte de alta velocidad y continuo: TiC/ Al_2O_3 .
- Corte continuo de servicio pesado: TiC/ Al_2O_3 /TiN.
- Corte ligero, interrumpido: TiC/TiC + TiN/TiN.

Los recubrimientos también están disponibles en **capas alternas multifásicas**; el espesor de estas capas es del orden de 2 a 20 μm , más delgadas que los recubrimientos regulares multifásicos (figura 22.8). La razón de usar recubrimientos más delgados es que la dureza se incrementa con la disminución del tamaño del grano, fenómeno similar al aumento de la resistencia de los metales con la disminución del tamaño del grano (vea la sección 1.5.1); así, las capas más delgadas son más duras que las capas más gruesas.

Una herramienta común de carburo con recubrimiento multifásico puede consistir en las siguientes capas, a partir de la superior, y sus funciones principales:

1. TiN: baja fricción.
2. Al_2O_3 : alta estabilidad térmica.
3. TiCN: reforzado con triquitas, con buen balance de resistencia al desgaste en el flanco y por cráter, particularmente efectivo para el corte interrumpido.
4. Sustrato de carburo delgado: alta resistencia a la fractura.
5. Sustrato de carburo grueso: duro y resistente a la deformación plástica a altas temperaturas.

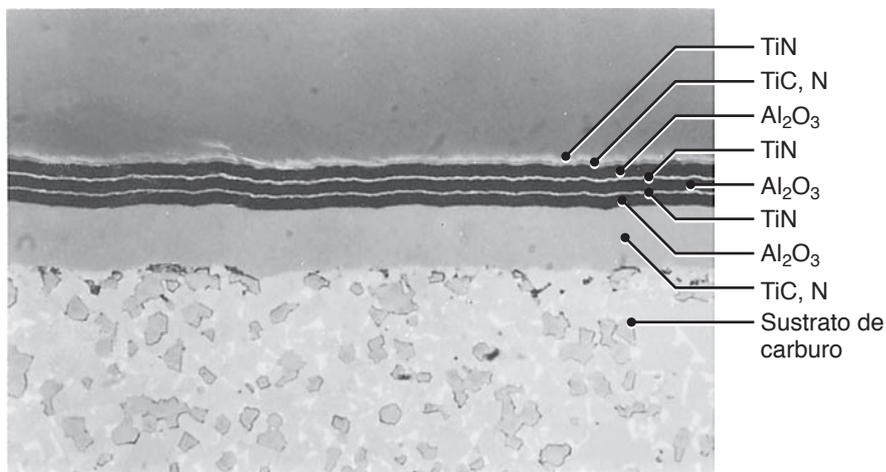


FIGURA 22.8 Recubrimientos multifásicos en un sustrato de carburo de tungsteno; tres capas alternantes de óxido de aluminio separadas por capas muy delgadas de nitruro de titanio. Se han fabricado insertos con hasta 13 capas de recubrimientos. Es común que los espesores de los recubrimientos estén en el rango de 2 a 20 μm . Fuente: Cortesía de Kennametal Inc.

Recubrimientos de diamante. En las secciones 8.7 y 34.13 describimos las propiedades y aplicaciones del diamante, los recubrimientos de diamante y el *carbono similar al diamante*, y en la sección 22.9 explicamos el uso que tienen dichos materiales como herramientas de corte. El *diamante policristalino* se utiliza extensamente como recubrimiento para las herramientas de corte, en particular sobre insertos de carburo de tungsteno y nitruro de silicio. Las herramientas recubiertas con diamante son particularmente efectivas para maquinar (a) metales no ferrosos, (b) materiales abrasivos como las aleaciones de aluminio que contienen silicio, (c) materiales compuestos de fibras reforzadas y de matriz metálica y (d) grafito. Se han obtenido mejoras de hasta 10 veces en la vida de las herramientas con respecto de las que tienen otros recubrimientos.

Los **insertos recubiertos con diamante**, disponibles comercialmente, tienen películas delgadas depositadas en sustratos por medio de técnicas PVD o CVD. Las películas gruesas de diamante se obtienen por medio de hacer crecer una lámina grande de diamante puro que después se corta con láser para adaptarse a la forma del inserto de carburo y soldarlo a éste. También están en desarrollo *recubrimientos de diamante multicapas de nanocristales* con capas de diamante entrelazadas que dan resistencia al recubrimiento. Como en todos los recubrimientos, resulta esencial desarrollar una buena adherencia de la película de diamante al sustrato y minimizar la diferencia en expansión térmica entre el diamante y los materiales del sustrato (vea la sección 3.6).

22.5.2 Materiales de recubrimiento diversos

En la mejoría del rendimiento de las herramientas recubiertas están teniendo lugar grandes avances. El **carbonitruro de titanio** (TiCN) y el **nitruro de titanio-aluminio** (TiAlN) son eficaces para cortar aceros inoxidable. El TiCN (depositado por medio de deposición física por vapor) es más duro y tenaz que el TiN y se puede usar en carburos y herramientas de acero de alta velocidad. El TiAlN es eficaz para maquinar aleaciones aeroespaciales. Los recubrimientos con base en cromo, tales como **carburo de cromo** (CrC), han resultado eficaces para maquinar metales suaves que tienen tendencia a adherirse a la herramienta de corte, como el aluminio, cobre y titanio. Otros materiales de recubrimiento incluyen el **nitruro de circonio** (ZrN) y el nitruro de hafnio (HfN).

Los desarrollos más recientes incluyen (a) **recubrimientos de nanocapas**, tales como carburo, boruro, nitruro, óxido o alguna combinación de éstos (vea también la sección 8.8), y (b) **recubrimientos compuestos** que usan toda una variedad de materiales. La dureza de algunos de estos recubrimientos se acerca a la del nitruro de boro cúbico (vea la figura 2.15).

22.5.3 Implantación de iones

En este proceso se introducen iones en la superficie de la herramienta de corte, lo que mejora sus propiedades superficiales (sección 34.7); el proceso no cambia las dimensiones de las herramientas. Las herramientas de carburo con implantes de **iones de nitrógeno** se han utilizado con éxito en aleaciones de acero y aceros inoxidable. También está en desarrollo la implantación de **iones de xenón** en herramientas.

22.6 Cerámicos base alúmina

Los materiales **cerámicos** para herramientas, introducidos a principios de la década de 1950, consisten sobre todo en **óxido de aluminio** de grano fino de gran pureza (sección 8.2). Se comprimen en frío para darles la forma del inserto a alta presión y después se sinterizan a alta temperatura, el producto final se conoce como **cerámicos blancos (presados en frío)**. La adición de carburo de titanio y óxido de circonio ayuda a mejorar propiedades tales como la tenacidad y la resistencia al choque térmico.

Las herramientas de *cerámicos base alúmina* tienen resistencia a la abrasión y dureza en caliente muy grandes (figura 22.9). Químicamente son más estables que los aceros

de alta velocidad y los carburos, de modo que tienen una tendencia menor a adherirse a los metales durante el maquinado y una correspondiente menor tendencia a formar un borde acumulado. En consecuencia, al maquinar hierros fundidos y aceros se obtiene un buen acabado con el empleo de herramientas de cerámicos. Por otro lado, generalmente los cerámicos carecen de tenacidad y su uso puede dar como resultado la falla prematura de la herramienta, por astillado o por una falla catastrófica.

Los insertos de cerámicos existen en formas similares a las de los insertos de carburo (sección 22.4.3). Son efectivos en operaciones de corte de alta velocidad y no interrumpidas, como las de acabado o acabado parcial. Para reducir el choque térmico, el corte debe efectuarse ya sea en seco o con una gran cantidad de fluido de corte aplicado en una corriente continua (sección 22.12). Una aplicación inadecuada o intermitente del fluido puede causar choque térmico y la fractura de la herramienta de cerámicos.

Son importantes la forma y preparación de la herramienta de cerámicos. Debido a la baja resistencia a la tensión de los cerámicos, generalmente son preferibles los ángulos de ataque negativos (ángulos grandes incluidos) para evitar el astillado. La falla de la herramienta se puede reducir al incrementar la rigidez y capacidad de humedecimiento de las máquinas herramienta, monturas y dispositivos para sujetar la pieza trabajo que reducen la vibración y el traqueteo.

Cermets. Los *cermets* (de las palabras *cerámico* y *metal*) consisten en partículas de cerámicos incrustadas en una matriz metálica. Se introdujeron en la década de 1960 y se conocen como *cerámicos negros* o *prensados en caliente* (carbóxidos). Un *cermet* común consiste en 70% de óxido de aluminio y 30% de carburo de titanio; otros *cermets* contienen carburo de molibdeno, carburo de niobio y carburo de tantalio. Aunque tienen estabilidad química y resistencia a la formación de bordes acumulados, la fragilidad y el alto costo de los *cermets* han sido una limitante para extender su uso.

Desarrollos y refinamientos adicionales de estas herramientas han dado como resultado su mejora en resistencia, tenacidad y confiabilidad. Su rendimiento está aproximadamente entre el de los cerámicos y el de los carburos y resultan apropiadas, en particular, para cortes primarios ligeros y cortes de acabado de alta velocidad. Las configuraciones de los rompevirutas son importantes para los insertos de *cermet*. Aunque los *cermets* pueden ser recubiertos, sus beneficios son algo controversiales ya que la mejora de su resistencia al desgaste parece ser marginal.

22.7 Nitruro de boro cúbico

Después del diamante, el *nitruro de boro cúbico* (BNc) es el material más duro que existe. Se introdujo en la década de 1962 con el nombre comercial de *Borazon* y se fabrica al adherir una capa de **nitruro de boro cúbico policristalino**, con espesor de 0.5 a 1 mm (0.02 a 0.04 pulg), a un sustrato de carburo por medio de sinterización a alta presión y temperatura. Mientras que el carburo proporciona resistencia al impacto, el BNc brinda una resistencia muy grande al desgaste y resistencia en el filo (figura 22.10).

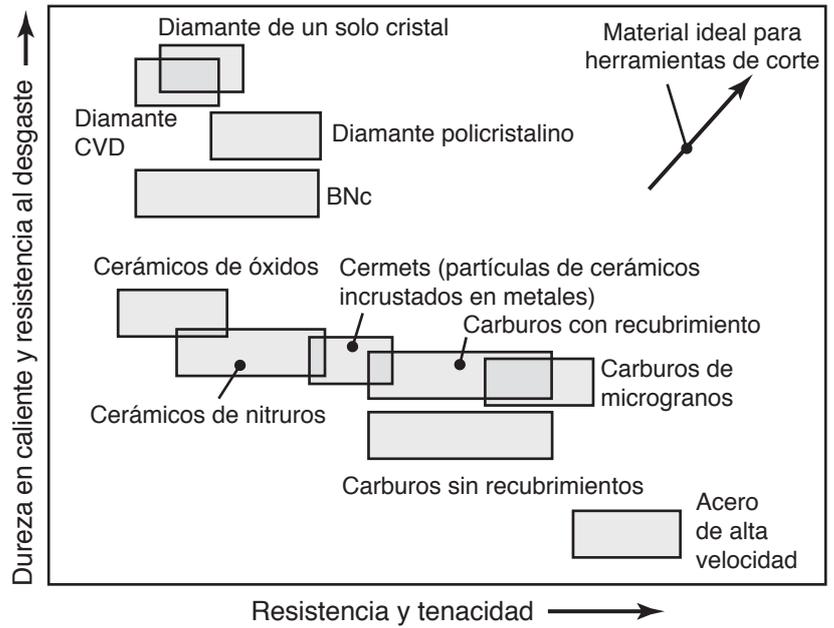


FIGURA 22.9 Rangos de las propiedades mecánicas de diferentes grupos de materiales para herramientas. PIC = prensado isostático en caliente (vea también las tablas 22.1 a 22.5).

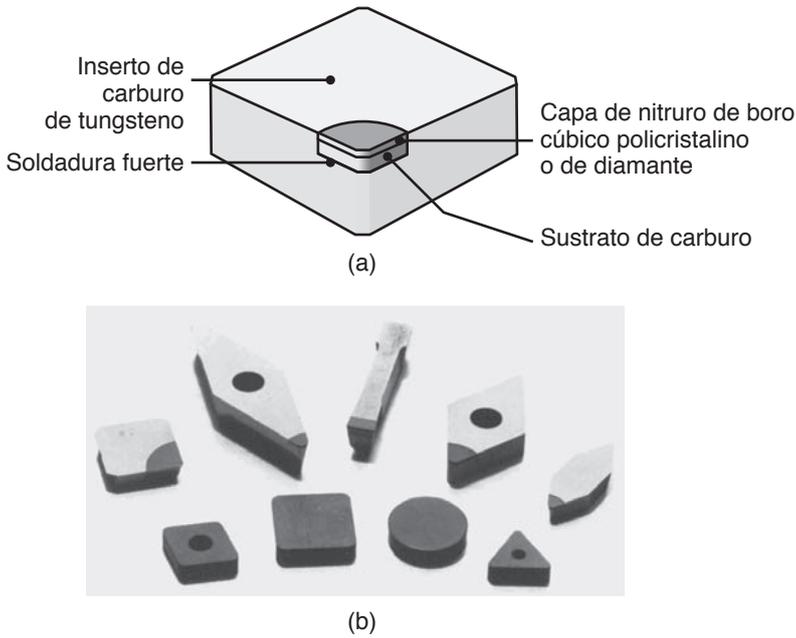


FIGURA 22.10 Insertos de nitruro de boro cúbico. (a) Inserto de una capa de nitruro de boro cúbico policristalino, o de capa de diamante, sobre carburo de tungsteno. (b) Insertos con extremos de nitruro de boro cúbico policristalino (parte superior de la figura) e insertos de BNC sólidos policristalinos (parte inferior). Fuente: (b) Cortesía de Valenite.

La estabilidad termoquímica del BNC es una ventaja significativa; se puede usar con seguridad hasta a 1200 °C (2200 °F). Asimismo, a temperaturas elevadas el BNC sigue inerte químicamente ante hierro y níquel, así que no hay desgaste por difusión. Su resistencia a la oxidación es elevada, esto lo hace particularmente apropiado para maquinado de aleaciones ferrosas endurecidas y de alta temperatura (vea *maquinado duro*, sección 25.6) y para operaciones de maquinado de alta velocidad (sección 25.5).

El BNC también se usa como abrasivo; sin embargo, debido a que estas herramientas son quebradizas, la rigidez de la máquina herramienta y la sujeción son importantes con objeto de evitar la vibración y el traqueteo. Además, con el fin de impedir el astillado y fracturado ocasionados por el choque térmico, el maquinado por lo general debe realizarse en seco, particularmente en operaciones de corte interrumpido, tales como el fresado, que someten a la herramienta a ciclos térmicos en repetidas ocasiones.

22.8 Cerámicos con base en nitruro de silicio

Desarrollados en la década de 1970, los materiales de herramientas *cerámicos con base en nitruro de silicio* (SiN) consisten en nitruro de silicio con diversas adiciones de óxido de aluminio, óxido de itrio y carburo de titanio. Estas herramientas tienen alta tenacidad, dureza en caliente y buena resistencia al choque térmico. Un ejemplo de material con base en SiN es el **Sialon**, llamado así por los elementos que lo componen: *silicio, aluminio, oxígeno y nitrógeno*. El Sialon tiene más resistencia al choque térmico que el nitruro de silicio a velocidades de corte intermedias, se recomienda para maquinado de hierros fundidos y súper aleaciones de níquel. Sin embargo, debido a su afinidad química con el hierro a elevadas temperaturas, las herramientas basadas en el SiN no son apropiadas para maquinado de aceros.

22.9 Diamante

De todos los materiales conocidos, la sustancia más dura es el diamante, descrito en la sección 8.7. Como herramienta de corte tiene propiedades deseables tales como poca fricción, alta resistencia al desgaste y la capacidad de mantener afilado el borde de corte. El diamante se utiliza cuando se requiere un buen acabado superficial y exactitud dimensional, particularmente cuando se maquinan aleaciones suaves no ferrosas y materiales abrasivos no metálicos y metálicos, en especial algunas aleaciones de aluminio-silicio. El *diamante sintético o industrial* se emplea mucho porque el natural tiene defectos que hacen que su desempeño sea impredecible.

Aunque se pueden utilizar **diamantes de un solo cristal** de varios quilates (para las piedras preciosas, 1 quilate = 200 mg) para aplicaciones especiales, han sido reemplazados en gran medida por herramientas de **diamantes policristalinos** (PCD, por sus siglas en inglés), llamados **compactos** (usados también como dados para trefilado, sección 15.7).

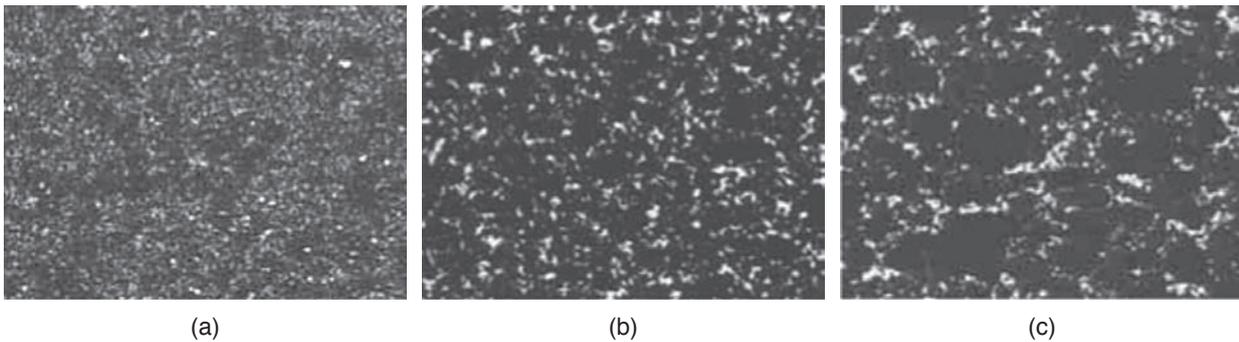


FIGURA 22.11 Microfotografías de compactos de diamante. (a) Diamante de grano fino con un tamaño promedio del grano de alrededor de $2\ \mu\text{m}$; (b) grano medio con un tamaño promedio de cerca de $10\ \mu\text{m}$; (c) grano grueso con tamaño promedio de $25\ \mu\text{m}$ aproximadamente. Existen en el comercio tamaños de grano que varían desde 0.5 hasta $30\ \mu\text{m}$. Fuente: Cortesía de Kennametal Inc.

Estas herramientas de diamante consisten en cristales sintéticos muy pequeños (figura 22.11) fundidos mediante un proceso de altas temperatura y presión, hasta un espesor de alrededor de 0.5 a $1\ \text{mm}$ (0.02 a 0.04 pulg), y adheridos a un sustrato de carburo; este producto es similar a las herramientas de BNc (figura 22.10). Los granos finos se usan cuando se requiere alta calidad en el borde de corte y gran resistencia; los granos gruesos son preferibles para obtener mayor resistencia a la abrasión. La orientación aleatoria de los cristales de diamante impide la propagación de grietas en su estructura, lo que mejora significativamente su tenacidad.

Debido a que el diamante es muy frágil (quebradizo), son importantes la forma de la herramienta y el filo. Por lo general, se utilizan ángulos de ataque pequeños para proporcionar un borde cortador fuerte debido a los grandes ángulos incluidos. Debe prestarse atención especial al montaje apropiado y a la orientación de los cristales con el fin de obtener una vida óptima de la herramienta. Puede haber desgaste por microastillado (ocasionado por esfuerzos térmicos y oxidación) y por transformación en carbón (por el calor generado durante el maquinado). Las herramientas de diamante pueden usarse satisfactoriamente a cualquier velocidad, pero son más apropiadas para cortes ligeros, no interrumpidos y de acabado. Con objeto de minimizar la fractura de la herramienta, el diamante de un solo cristal debe volverse a afilar tan pronto como se haga romo. Debido a la gran afinidad química a temperaturas elevadas (lo que da como resultado la difusión), el diamante no se recomienda para maquinar aceros al carbón planos o para aleaciones basadas en titanio, níquel y cobalto.

22.10 Materiales y nanomateriales reforzados con triquitas

Con el fin de mejorar aún más el rendimiento y la resistencia al desgaste de las herramientas cortadoras, particularmente en el maquinado de nuevos materiales y compuestos, de continuo se hacen progresos en el desarrollo de nuevos materiales para herramienta que contienen propiedades mejoradas como las siguientes:

- Alta tenacidad a la fractura.
- Resistencia al choque térmico.
- Fortaleza del filo.
- Resistencia a la fluencia.
- Dureza en caliente.

Los avances incluyen el uso de **triquitas** como refuerzos en materiales compuestos destinados a la herramienta cortante. Los ejemplos de *herramientas cortadoras reforzadas* con base en triquitas incluyen: (a) herramientas basadas en nitruro de silicio refor-

zadas con triquitas de carburo de silicio (SiC) y (b) herramientas basadas en óxido de aluminio reforzadas con 25 a 40% de triquitas de carburo de silicio, en ocasiones con adición de *óxido de circonio* (ZrO_2). Es común que las triquitas de carburo de silicio tengan una longitud de 5 a 100 μm y de 0.1 a 1 μm de diámetro. Sin embargo, la gran reactividad del carburo de silicio con los metales ferrosos hace que las herramientas reforzadas con SiC no sean apropiadas para maquinarse hierros y aceros.

Los *nanomateriales* también se están volviendo importantes como materiales avanzados para herramientas de corte (vea la sección 8.8); los nanomateriales apropiados son los carburos y los cerámicos. Es frecuente que los nanomateriales se apliquen como un recubrimiento delgado, por lo general en un intento por obtener una vida razonable para la herramienta sin el empleo de un refrigerante (vea *maquinado en seco*, sección 22.12.1) o para maquinarse a altas velocidades (vea la sección 25.5).

22.11 Costos y reacondicionamiento de herramientas

Los *costos de la herramienta* varían considerablemente dependiendo del material de la herramienta, de su tamaño, forma, características del rompevirutas y de su calidad. El costo aproximado para un *inserto* común de 0.5 pulg (12.5 mm) es aproximadamente de (a) \$10 a \$15 dólares estadounidenses para carburos sin recubrimiento, (b) \$10 a \$25 para carburos recubiertos, (c) \$30 a \$50 para cerámicos, (d) \$50 a \$90 para carburos recubiertos con diamante, (e) \$130 a \$180 para nitruro de boro cúbico y (f) \$150 a \$200 para un inserto con punta de diamante.

Después de revisar los costos involucrados en el maquinado y de considerar todos los aspectos de la operación total, puede verse que el costo de un inserto individual es relativamente insignificante. Se estima que en el maquinado los costos del herramental son del orden del 2 al 4% de los costos de la manufactura. Esta pequeña cantidad se debe al hecho de que una sola herramienta cortadora, por ejemplo, puede realizar una gran cantidad de remoción de material pero se indexa para usar todos los bordes cortantes de un inserto y, eventualmente, se recicla. Recuerde que en la sección 21.5 vimos que la vida esperada de una herramienta está en el rango de 30 a 60 minutos; entonces, si se considera que un inserto cuadrado tiene ocho bordes cortantes, una herramienta puede durar muchas horas antes de ser retirada de la máquina herramienta y reemplazada por otra.

Las herramientas cortantes se pueden **reacondicionar** por medio de afilarlas de nuevo empleando herramientas y esmeriles cortadores con características especiales (sección 26.4). Esta operación se lleva a cabo a mano o mediante una herramienta controlada por computadora y con esmeriles cortadores. También existen métodos avanzados para torner herramientas de corte, como se describe en el capítulo 27. El reacondicionamiento de herramientas recubiertas también se efectúa volviéndolas a recubrir, por lo general en instalaciones especiales diseñadas para este propósito; es importante que las herramientas reacondicionadas tengan las mismas características geométricas que las originales. Con frecuencia debe tomarse una decisión sobre si resulta económico el reacondicionamiento de las herramientas, en especial cuando los costos de los insertos pequeños más comunes no constituyen una fracción grande del costo total. El *reciclado* de las herramientas siempre es una consideración significativa, en especial si contienen materiales caros y de importancia estratégica tales como tungsteno y cobalto.

22.12 Fluidos de corte

Los *fluidos de corte* se usan extensivamente en las operaciones de maquinado con los siguientes propósitos:

- Reducir la fricción y el desgaste para mejorar la vida de la herramienta y el acabado de la superficie de la pieza de trabajo.
- Enfriar la zona de corte, lo que mejora la vida de la herramienta y reduce la temperatura y distorsión térmica de la pieza de trabajo.
- Reducir las fuerzas y el consumo de energía.

- Eliminar las virutas de la zona de corte para impedir que interfieran con la operación de corte, en particular durante las perforaciones y el maquinado de cuerdas internas.
- Proteger la superficie maquinada de la corrosión ambiental.

En función del tipo de operación de maquinado, el fluido de corte requerido puede ser un **refrigerante**, un **lubricante** o ambos. La efectividad de los fluidos de corte depende de varios factores como el tipo de operación del maquinado, los materiales de la herramienta y la pieza de trabajo, la velocidad de corte y el método de aplicación. El agua es un refrigerante excelente y reduce de modo eficaz las altas temperaturas que se generan en la zona de corte; sin embargo, no es un lubricante efectivo porque no reduce la fricción y ocasiona corrosión de las piezas de trabajo y los componentes de la máquina herramienta.

La necesidad de un fluido de corte depende de la *severidad* de la operación de maquinado en particular, definida como (a) las temperaturas y fuerzas encontradas y la capacidad de los materiales de la herramienta para manejarlas, (b) la tendencia a la formación de un borde acumulado en el cortador, (c) la facilidad con que pueden retirarse las virutas de la zona de corte y (d) la eficacia con que los fluidos pueden suministrarse en la región apropiada en la interfase herramienta-viruta. Las severidades relativas de procesos de maquinado específicos son, en orden creciente, aserrar, torneear, fresar, taladrar, cortar engranes, corte de cuerdas, cuerdas internas (machuelear) y brochados.

Sin embargo, existen operaciones en las que la acción refrigerante de los fluidos de corte puede ser perjudicial. Por ejemplo, se ha demostrado que los fluidos de corte pueden causar que la viruta se haga *más rizada* (vea la figura 21.9c), lo que concentra el calor más cerca del extremo de la herramienta y reduce la vida de ésta. Además, en operaciones de corte interrumpido, como el fresado con múltiples cortadores dentados, el enfriamiento de la zona de corte lleva a ciclos térmicos en los dientes cortadores, lo que genera *fisuras térmicas* debido a la fatiga o al choque térmico.

Acción del fluido de corte. Los mecanismos básicos de lubricación utilizados en las operaciones de trabajo de metales se describen con más detalle en la sección 33.6. Los estudios muestran que el fluido de corte accede a la interfase herramienta-viruta por medio de escurrimiento desde los lados de la viruta (en forma perpendicular a la página en las figuras 21.11 y 21.12), a través de la *acción capilar* en la red de entrelazamiento de las asperezas de la superficie en la interfase.

Debido al reducido tamaño de esta red capilar, el fluido de corte debe tener un *tamaño molecular pequeño* y poseer características apropiadas de *humedecimiento (tensión superficial)*. Así que, por ejemplo, la grasa no es un lubricante efectivo en el maquinado, mientras que los aceites de poco peso molecular suspendidos en agua (*emulsiones*) sí lo son. Observe que en operaciones discontinuas de maquinado los fluidos de corte tienen más acceso a las interfases herramienta-viruta, pero entonces las herramientas son más susceptibles al choque térmico.

EJEMPLO 22.1 Efectos de los fluidos de corte en el maquinado

Dado: Una operación de maquinado se lleva a cabo con un fluido de corte que es un lubricante eficaz.

Se solicita: Describir los cambios en la mecánica de la operación de corte si el suministro de fluido se interrumpe.

Respuesta: Como el fluido de corte es un buen lubricante, después de suspenderse el flujo tendrá lugar la siguiente cadena de eventos:

1. Aumentará la fricción en la interfase herramienta-viruta.
2. El ángulo del cortante disminuirá de acuerdo con la ecuación (21.3).
3. El esfuerzo cortante se incrementará, como resultado de la ecuación (21.2).
4. La viruta se hará más gruesa.
5. Es probable que se forme un borde acumulado en el cortador.

Como resultado de estos cambios, ocurrirá lo siguiente:

1. Aumentará la energía cortante en la zona primaria.
2. Se incrementará la energía de fricción en la zona secundaria.
3. La energía total aumentará.
4. Subirá la temperatura en la zona de corte, lo que ocasionará desgaste de la herramienta.
5. El acabado de la superficie de la pieza de trabajo comenzará a deteriorarse y será difícil mantener la exactitud dimensional debido a mayor temperatura y mayor expansión térmica de la pieza de trabajo durante el maquinado.

Tipos de fluidos de corte. En la sección 33.7 se describen las características y aplicaciones de los fluidos que se utilizan para trabajar metales. En breves palabras, en las operaciones de maquinado es común que se utilicen cuatro tipos generales de fluidos de corte:

1. **Aceites**, también llamados *aceites puros*, incluyen los de origen mineral, vegetal, compuestos y sintéticos; es común que se usen para operaciones de baja velocidad en las que el aumento de temperatura no es significativo.
2. **Emulsiones**, también llamadas *aceites solubles*, son una mezcla de aceite, agua y aditivos; generalmente se usan para operaciones de alta velocidad en las que el aumento de temperatura es significativo. La presencia de agua hace que las emulsiones sean refrigerantes eficaces y la presencia de aceite reduce o elimina la tendencia que tiene el agua a causar oxidación en las superficies de la pieza de trabajo.
3. **Fluidos semisintéticos**, son emulsiones químicas que contienen poco aceite mineral diluido en agua y con aditivos que reducen el tamaño de las partículas de aceite, esto las hace más efectivas.
4. **Fluidos sintéticos**, son químicos con aditivos diluidos en agua y que no contienen aceite.

Debido a las complejas interacciones entre el fluido de corte, los materiales de la pieza de trabajo, la temperatura, el tiempo y las variables del proceso de corte no puede generalizarse la selección y aplicación de fluidos. En los capítulos 23 y 24 se dan recomendaciones acerca de fluidos de corte para operaciones específicas de maquinado.

Métodos de aplicación del fluido de corte. Hay cuatro métodos básicos de aplicación del fluido de corte en el maquinado:

1. **Vertido.** Éste es el método más común, como se ilustra en la figura 22.12, en la que se indican prácticas correctas e incorrectas para verter. Las tasas de flujo por lo general varían de 10 l/min (3 gal/min) para herramientas de un solo punto a 225 l/min (60 gal/min) por cortador en cortadores de dientes múltiples, como en el fresado. En ciertas operaciones tales como el taladrado y el fresado, también se emplean presiones de fluido que están en el rango de 700 a 14 000 kPa (100 a 2000 psi) para retirar las virutas producidas e impedir que interfieran con la operación.
2. **Nebulizado.** Este tipo de refrigeración suministra fluido en áreas inaccesibles, en forma similar a como se emplea una lata de aerosol, y proporciona una mejor visibilidad de la pieza de trabajo que se maquina, en comparación con el vertido del refrigerante. Este método es particularmente eficaz con fluidos basados en agua y a presiones de aire que varían de 70 a 600 kPa (10 a 80 psi). Sin embargo, tiene una capacidad de refrigeración limitada y requiere de ventilación para evitar que el operador de la máquina y otras personas ubicadas en las cercanías inhalen las partículas de fluido presentes en el aire.
3. **Sistemas de alta presión.** Con el incremento de velocidad y potencia de las máquinas herramientas controladas por computadora, la generación de calor en el maquinado se ha convertido en un factor significativo. Particularmente efectivo es el uso de *sistemas de enfriamiento refrigerado* de alta presión para aumentar la tasa de intercambio de calor. También se usan presiones altas para conducir el fluido de

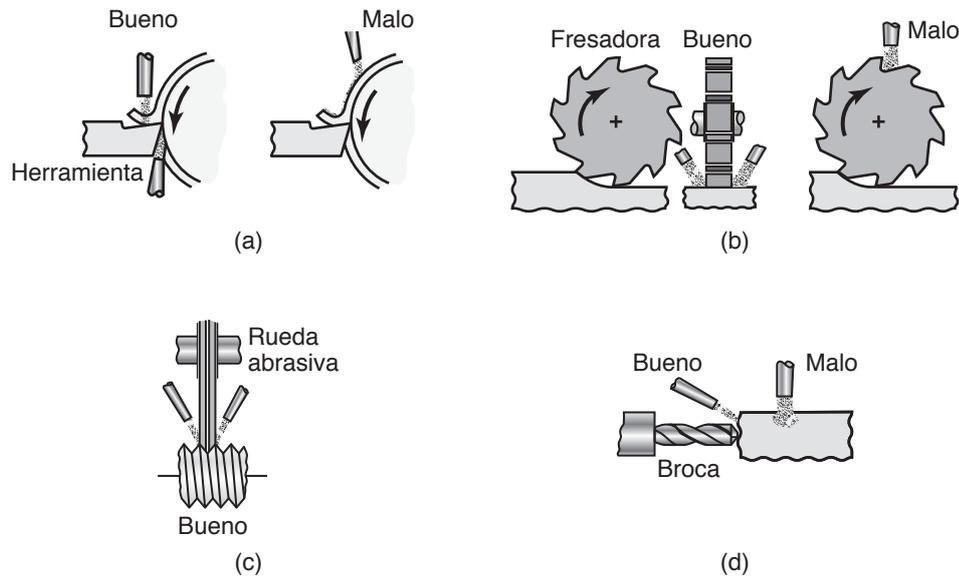


FIGURA 22.12 Ilustración esquemática de los métodos de aplicación de fluidos de corte (por vertido) en distintas operaciones de maquinado: (a) torneado, (b) fresado, (c) esmerilado de rosca y (d) barrenado.

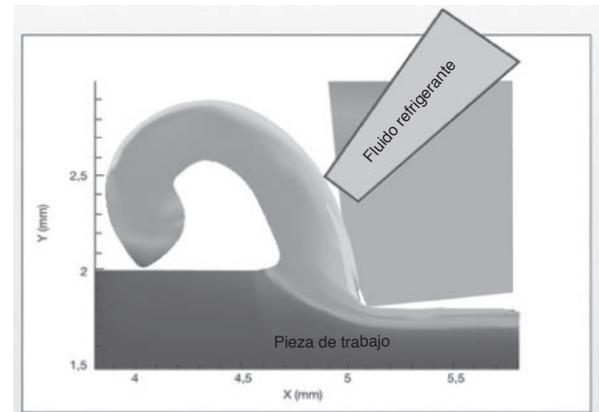
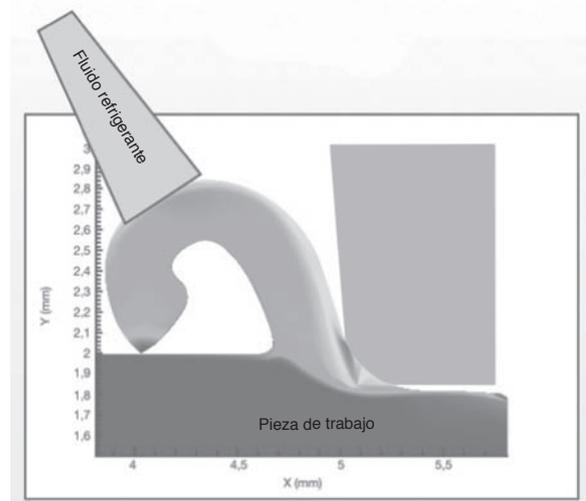
corte a través de boquillas de diseño especial que dirigen un chorro poderoso a la zona de corte, en particular a la *cara de alivio* u *holgura* de la herramienta (vea la figura 21.3). Las presiones están por lo general en el rango de 5.5 a 35 MPa (800 a 5000 psi), también actúan como rompevirutas en situaciones en las que éstas serían largas y continuas e interferirían en la operación de corte. Es esencial mantener ciclos adecuados así como el filtrado continuo del fluido con el fin de mantener la calidad de la superficie de la pieza de trabajo.

La figura 22.13 muestra un diseño más reciente con el que se logra buen rendimiento con menores requerimientos de presión. Se ha encontrado que este método es especialmente efectivo para maquinado de titanio y otros materiales difíciles y que con él la vida de la herramienta se incrementa en más del 300%. En lugar de aplicar refrigerante a la superficie de la pieza de trabajo o viruta desde una gran distancia de la zona de corte, se aplica en un *lado* del inserto. Para profundidades de corte controladas, el aumento de temperatura en la herramienta y las virutas se reduce de manera significativa, como se aprecia en la figura 22.13b.

4. **A través del sistema de la herramienta de corte.** Para una aplicación más efectiva, se practican pasajes angostos en las herramientas de corte y en los portaherramientas, a través de los cuales se suministran los fluidos de corte a alta presión. Dos aplicaciones de este método son (a) barrenado de armas de fuego, que se muestra en la figura 23.22 —observe el largo y angosto barreno a través del cuerpo de la broca en sí—, y (b) barras de perforación, figura 23.17a, donde hay un largo barreno a través del zanco en el portaherramientas al cual se sujeta un inserto. Se han desarrollado diseños similares para herramientas e insertos de corte y para distribuir fluidos de corte a través del perno de la máquina herramienta.

Efectos de los fluidos de corte. La selección de un fluido de corte debe incluir también consideraciones tales como sus efectos en

- El material de la pieza de trabajo.
- Los componentes de la máquina herramienta.
- Las consideraciones biológicas.
- El ambiente.



(a)

(b)

FIGURA 22.13 (a) Inserto de torno con refrigerante aplicado a través de la herramienta; (b) comparación de las distribuciones de temperatura para una aplicación normal y para la que se hace a través de la herramienta. El material de la pieza de trabajo es Inconel 718; velocidad de corte = 180 m/min, avance = 0.020 pulg/rev, y recubrimiento de la herramienta = TiC. Fuente: Cortesía de Kennametal Inc.

Para seleccionar un fluido de corte apropiado se debe considerar si el componente maquinado estará sujeto a esfuerzos y efectos adversos durante su vida de servicio que posiblemente conduzcan a fracturas por esfuerzos de corrosión. Por ejemplo, (a) los fluidos de corte que contengan azufre no deben emplearse con aleaciones basadas en níquel y (b) los fluidos de corte que contengan cloro no deben usarse con titanio porque aumentan la corrosión. Además las partes maquinadas deben limpiarse y lavarse para eliminar cualquier residuo del fluido cortador, como se describe en la sección 34.16. Debido a que la operación de limpieza puede tener requerimientos significativos de tiempo y costo, la tendencia es usar fluidos basados en agua, de baja viscosidad, para facilitar su limpieza y filtrado. Debido a que los fluidos de corte pueden afectar también de modo adverso los componentes de la máquina herramienta, debe tomarse en cuenta su compatibilidad con diferentes materiales metálicos y no metálicos presentes en la máquina.

Asimismo, una preocupación principal deben ser los *efectos en la salud* de los operadores de las máquinas que están en contacto con los fluidos. El rocío, emanaciones, humo y olores de los fluidos de corte pueden ocasionar severas reacciones en la piel y problemas respiratorios, en especial cuando se utilizan fluidos con componentes químicos tales

como azufre, cloro, fósforo, hidrocarburos, biocidas y diversos aditivos. Se han hecho muchos progresos para asegurar el uso seguro de los fluidos de corte en las instalaciones manufactureras, inclusive la reducción o eliminación de su uso mediante la consideración de las tendencias más recientes en cuanto a técnicas de maquinado en seco o casi seco, así como en el diseño de máquinas herramienta con áreas de trabajo cerradas (vea las figuras 25.2 y 25.12).

Los fluidos de corte, así como otros fluidos del trabajo de metales que se usan en las operaciones de manufactura pueden experimentar cambios químicos cuando se usan en forma repetida durante cierto tiempo. Estos cambios se deben a efectos ambientales o a la contaminación procedente de distintas fuentes, incluyendo virutas metálicas, partículas finas generadas durante el maquinado y *corrientes de aceite* (aceites procedentes de fugas en los sistemas hidráulicos, en elementos deslizantes de las máquinas, y de sistemas de lubricación de las máquinas herramienta). Los cambios pueden involucrar también la proliferación de microbios (bacterias, mohos y levaduras), sobre todo en presencia de agua, lo que se convierte en un riesgo ambiental y también afecta de manera adversa las características y efectividad de los fluidos de corte.

Se dispone de varias técnicas para limpiar los fluidos de corte una vez usados, tales como el reposo, espumado, centrifugado y filtrado. El reciclado involucra el tratamiento de los fluidos con varios aditivos, agentes, biocidas y desodorizantes, así como el tratamiento del agua (cuando es la base de los fluidos). Las prácticas de eliminación de estos fluidos deben cumplir con las leyes y reglamentos federales, estatales y locales.

22.12.1 Maquinado casi seco y en seco

Por razones económicas y ambientales, desde la década de 1990 se ha presentado una tendencia mundial continua por minimizar o eliminar el uso de fluidos en el trabajo de metales. Esta tendencia condujo a la práctica de *maquinado casi seco* (NDM, por sus siglas en inglés), con beneficios significativos como los siguientes:

- Mitigación del impacto ambiental proveniente del uso de fluidos de corte, lo que mejora la calidad del aire en las plantas manufactureras y reduce los riesgos para la salud.
- Reducción del costo de las operaciones de maquinado, incluyendo el costo por mantenimiento, reciclado y eliminación de los fluidos de corte.

Lo significativo de este enfoque se hace evidente al observar que tan sólo en Estados Unidos se consumen millones de litros de fluidos para el trabajo de metales cada año. Además, se ha estimado que dichos fluidos constituyen del 7 al 17% del costo total del maquinado.

El principio tras el corte casi seco es la aplicación de una nebulización fina de una mezcla de aire con fluido, la cual contiene una cantidad muy pequeña de fluido de corte que puede reformularse para que contenga aceite vegetal. La mezcla se lleva a la zona de corte a través del *eje* de la máquina herramienta, en general, mediante una boquilla de 1 mm de diámetro y a una presión de 600 kPa (85 psi). Se usa a razón de 1 a 100 cc/h, que se estima es un máximo de un diezmilésimo del que se emplea en un fluido refrigerante. En consecuencia, el proceso también se conoce como *lubricación de mínima cantidad* (MQL, por sus siglas en inglés).

El *maquinado en seco* también es una alternativa viable. Con los grandes avances en las herramientas de corte, el maquinado en seco se ha revelado como efectivo en distintas operaciones de maquinado, sobre todo en el torneado, fresado y corte de engranes, en aceros, aleaciones de acero y hierros fundidos, aunque en general no lo es para aleaciones de aluminio.

Una de las funciones de un fluido de corte es *eliminar* las virutas de la zona de corte. Aunque esta función pareciera todo un desafío con el maquinado en seco, se han desarrollado diseños de herramientas que permiten la aplicación de *aire presurizado*, con frecuencia a través del vástago de la herramienta. Aunque el aire comprimido no sirve como lubricante y sólo tiene una capacidad limitada de refrigeración, es muy eficaz para retirar las virutas de la zona de corte.

Maquinado criogénico. Los desarrollos más recientes en el maquinado incluyen el uso de gases criogénicos, tales como *nitrógeno* o *dióxido de carbono*, como refrigerantes. Se inyecta nitrógeno líquido a la zona de corte, con boquillas de pequeño diámetro y a una temperatura de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-320\text{ }^{\circ}\text{F}$). Debido a lo reducido de la temperatura, la dureza de la herramienta se conserva y por lo tanto mejora su vida, lo que permite aplicar mayores velocidades de corte. Las virutas también son menos dúctiles, esto incrementa la maquinabilidad. No hay impacto ambiental perjudicial porque el nitrógeno simplemente se evapora.

RESUMEN

- Los materiales de las herramientas de corte tienen un amplio rango de propiedades mecánicas y físicas, tales como dureza en caliente, tenacidad, estabilidad química y ausencia de reactividad, así como resistencia al astillado y al desgaste. Ahora se dispone de una gran variedad de materiales para las herramientas de corte, los de uso más común son los aceros de alta velocidad, carburos, cerámicos, nitruro de boro cúbico y diamantes.
- Se han desarrollado varios recubrimientos para las herramientas, lo que ha resultado en grandes mejoras en la vida de las herramientas, en el acabado de las superficies y en la economía de las operaciones de maquinado. Los materiales comunes para el recubrimiento son el nitruro de titanio, carburo de titanio, carbonitruro y óxido de aluminio. La tendencia es hacia los recubrimientos multifásicos para lograr un mejor desempeño.
- La selección de los materiales apropiados para la herramienta no sólo depende del material por maquinarse sino también de los parámetros del proceso y de las características de la máquina herramienta.
- Los fluidos de corte son importantes en las operaciones de maquinado ya que reducen la fricción, el desgaste y las fuerzas de corte, así como los requerimientos de energía. Por lo general, operaciones de corte más lentas y las que se efectúan con grandes presiones en la herramienta requieren un fluido con buenas características de lubricación. En las operaciones de alta velocidad, donde el aumento de temperatura puede ser significativo, se necesitan fluidos con buena capacidad de refrigeración y alguna de lubricación. La selección de los fluidos de corte debe tomar en cuenta sus posibles efectos perjudiciales en las partes que se maquinan, en las máquinas herramientas y sus componentes, en el personal y en el medio ambiente.

TÉRMINOS CLAVE

Aceros de alta velocidad	Cortes de acabado	Insertos	Reacondicionamiento de herramientas
Aleaciones fundidas de cobalto	Costos de la herramienta	Lubricantes	Recubrimientos de diamante
Carburo de titanio	Desbaste	Maquinado casi seco	Recubrimientos multifásicos
Carburo de tungsteno	Diamante policristalino	Maquinado criogénico	Refrigerantes
Carburos	Estabilidad química	Maquinado en seco	Resistencia al desgaste
Carburos de micrograno	Estelita	Moho	Rompevirutas
Carburos sin recubrimiento	Fluidos de corte	Nanocristalino	Sialon
Cerámicos	Herramientas con recubrimiento	Nitruro de boro cúbico	Tenacidad
Cerámicos base alúmina	Herramientas de diamante	Nitruro de boro cúbico policristalino	Vertido
Cerámicos con base en nitruro de silicio	Herramientas reforzadas con triquitas	Nitruro de titanio	
Cermets			

BIBLIOGRAFÍA

- ASM Handbook, Vol. 16: Machining, ASM International, 1989.
- ASM Specialty Handbook: Tool Materials, ASM International, 1995.
- Astakhov, V. P., Tribology of Metal Cutting, Elsevier, 2007.
- Astakhov, V. P. y Joksch, S., Metalworking, Fluids for Cutting and Grinding: Fundamentals and Recent Advances, Woodhead, 2012.

- Byers, J. P. (ed.), *Metalworking Fluids*, 2a. ed., CRC Press, 2006.
- Jackson, M. J. y Morrell, J., *Machining with Nanomaterials*, Springer, 2009.
- Komanduri, R., *Tools Materials*, en *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4a. ed., Vol. 24, 1997.
- Nachtman, E. S. y Kalpakjian, S., *Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations*, Marcel Dekker, 1985.
- Roberts, G. A., Krauss, G. y Kennedy, R., *Tools Steels*, 5a. ed., ASM International, 1997.
- Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles*, 2a. ed., Oxford, 2005.
- Smith, G. T., *Cutting Tool Technology: Industrial Handbook*, Springer, 2008.
- Trent, E. M. y Wright, P. K., *Metal Cutting*, 4a. ed., Butterworth-Heinemann, 2000.

PREGUNTAS DE REPASO

- 22.1** ¿Cuáles son las principales propiedades requeridas para los materiales de las herramientas de corte? ¿Por qué?
- 22.2** ¿Cuál es la composición típica de una herramienta de carburo?
- 22.3** ¿Por qué se desarrollaron los insertos de las herramientas de corte?
- 22.4** ¿Por qué están recubiertas ciertas herramientas? ¿Cuáles son los materiales comunes de recubrimiento?
- 22.5** Explique las aplicaciones y limitantes de las herramientas de cerámicos.
- 22.6** Liste las funciones principales de los fluidos de corte.
- 22.7** ¿Por qué es importante la tenacidad para los materiales de las herramientas de corte?
- 22.8** ¿Es importante el módulo de elasticidad para los materiales de las herramientas de corte? Explique su respuesta.
- 22.9** Explique cómo penetran los fluidos de corte en la interfase herramienta-viruta.
- 22.10** Liste los métodos por los cuales se aplican comúnmente los fluidos en las operaciones de maquinado.
- 22.11** Describa las ventajas y limitaciones de las herramientas de diamante (a) de un solo cristal y (b) policristalino.
- 22.12** ¿Qué es un cermet? ¿Cuáles son sus ventajas?
- 22.13** Explique la diferencia entre la serie M y la serie T de los aceros de alta velocidad.
- 22.14** ¿Por qué se prefiere por lo general al BNc sobre el diamante para el maquinado de aceros?
- 22.15** ¿Cuáles son las ventajas del maquinado en seco?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 22.16** Explique por qué se han desarrollado en el transcurso del tiempo tantos tipos diferentes de materiales para las herramientas de corte. ¿Por qué aún continúa dicho desarrollo?
- 22.17** ¿Cuáles propiedades del material para herramientas son apropiadas para las operaciones de corte interrumpido? ¿Por qué?
- 22.18** Describa las razones y ventajas de recubrir las herramientas de corte con múltiples capas de diferentes materiales.
- 22.19** Elabore una lista de los elementos de aleación usados en los aceros de alta velocidad. Explique cuáles son sus funciones y por qué son eficaces en las herramientas de corte.
- 22.20** Como se dijo en la sección 22.1, los materiales de las herramientas pueden tener propiedades que resulten conflictivas al ser usadas en las operaciones de maquinado. Describa sus observaciones al respecto.
- 22.21** Explique el impacto económico de la tendencia que se muestra en la figura 22.6.
- 22.22** ¿Por qué la temperatura tiene un efecto tan importante en la vida de la herramienta?
- 22.23** Las herramientas de corte hechas con cerámicos y cermet tienen ciertas ventajas sobre las de carburo. Entonces, ¿por qué no las han sustituido por completo?
- 22.24** ¿Qué precauciones tomaría usted al maquinar con materiales frágiles, en especial con cerámicos? Explique su respuesta.
- 22.25** ¿Los fluidos de corte pueden tener algún efecto perjudicial en el maquinado? Si es así, ¿cuál es el efecto?
- 22.26** Describa las tendencias que observe en la tabla 22.2.
- 22.27** ¿Por qué son importantes la estabilidad química y la ausencia de reactividad en las herramientas de corte?
- 22.28** Los recubrimientos de nitruro de titanio en las herramientas reducen el coeficiente de fricción en la interfase herramienta-viruta. ¿Qué es lo significativo de esta propiedad?
- 22.29** Describa las condiciones necesarias para la utilización óptima de las capacidades de las herramientas de diamante y nitruro de boro cúbico.
- 22.30** Los ángulos de ataque negativos por lo general son preferibles para las herramientas de cerámicos, diamante y nitruro de boro cúbico. ¿Por qué?
- 22.31** ¿Piensa usted que existe una relación entre el costo de una herramienta de corte y su dureza en caliente? Explique su respuesta.
- 22.32** Haga una revisión de la literatura técnica y proporcione algunos valores comunes de las velocidades de corte para las herramientas de acero de alta velocidad y para varios materiales de la pieza de trabajo.
- 22.33** En la tabla 22.1, las últimas dos propiedades listadas son importantes para la vida de una herramienta de corte. ¿Por qué?
- 22.34** Se ha establecido que los recubrimientos de nitruro de titanio permiten que las velocidades de corte y la alimentación

sean mayores que las de herramientas sin recubrimiento. Revise en la bibliografía técnica y prepare una tabla que muestre el incremento porcentual de las velocidades y alimentaciones que serían posibles con el recubrimiento de las herramientas.

22.35 En la figura 22.1 observe que todos los materiales, en especial los carburos, tienen un amplio rango de dureza para una temperatura en particular. Describa cada uno de los factores responsables de dicha amplitud de rango.

22.36 En relación con la tabla 22.1, diga cuáles materiales de las herramientas serían apropiados para las operaciones de corte interrumpido. Explique su respuesta.

22.37 ¿Cuál de las propiedades listadas en la tabla 22.1 es, en opinión de usted, la menos importante en las herramientas de corte? Explique su respuesta.

22.38 Si se pretende que una broca solamente se use en aplicaciones de trabajo en madera, ¿cuál es el material del que más

probablemente esté hecha? [*Sugerencia:* las temperaturas rara vez llegan a 400 °C en el trabajo de la madera]. Explique su respuesta.

22.39 ¿Cuáles son las consecuencias de que en una herramienta un recubrimiento tenga distinto coeficiente de expansión térmica que el material del sustrato?

22.40 Analice las ventajas y limitaciones relativas del maquinado en seco. Tome en cuenta todos los aspectos técnicos y económicos.

22.41 Los fluidos de corte en emulsión constan, por lo general, de 95% de agua y 5% de aceite soluble y aditivos químicos. ¿A qué se debe este desequilibrio? En todo caso, ¿se necesita el aceite?

22.42 Liste y explique las consideraciones involucradas en determinar si una herramienta de corte debe reacondicionarse, reciclarse o descartarse después de su uso.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

22.43 Revise el contenido de la tabla 22.1. Grafique varias curvas que muestren las relaciones, si las hubiera, entre parámetros tales como dureza, resistencia a la ruptura transversal y resistencia al impacto. Comente sus observaciones.

22.44 Obtenga datos sobre las propiedades térmicas de varios fluidos de corte de uso común. Identifique aquellos que básicamente sean refrigerantes efectivos (como los fluidos ba-

sados en agua) y los que sean básicamente lubricantes (como los aceites).

22.45 La primera columna de la tabla 22.2 muestra 10 propiedades importantes para las herramientas de corte. En cada uno de los materiales listados en la tabla, agregue datos numéricos para sus propiedades. Describa sus observaciones, inclusive los datos que se traslapen.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

22.46 Describa con detalle sus pensamientos acerca de los factores técnicos y económicos involucrados en la selección del material para herramienta.

22.47 Una de las principales preocupaciones con los refrigerantes es la degradación debida al ataque biológico de las bacterias. Para prolongar la vida de un refrigerante, a menudo se agregan biocidas químicos que complican mucho la eliminación del refrigerante. Investigue en la bibliografía sobre los desarrollos más recientes en el uso, en los fluidos de corte, de biocidas benignos para el ambiente.

22.48 ¿Cómo mediría usted la eficacia de los fluidos de corte? Describa su método y explique cualesquiera dificultades que encuentre.

22.49 Contacte a varios proveedores de herramientas de corte o busque en sus sitios web. Haga una lista de los costos de herramientas de corte comunes en función de sus tamaños, formas y características.

22.50 Hoy en día existen diversos tipos de materiales de herramientas de corte disponibles para operaciones de maquina-

do porque se ha hecho mucha investigación y desarrollo con respecto a todos ellos. ¿Por qué piensa usted que se efectúan dichos estudios? Analice su respuesta.

22.51 Suponga que usted está a cargo de un laboratorio para desarrollar nuevos fluidos de corte mejorados. Sobre la base de los temas presentados en este capítulo y el anterior, sugiera una lista de temas de investigación para su equipo. Explique por qué eligió los temas.

22.52 La vida de la herramienta podría aumentarse mucho si se desarrollara un medio efectivo de enfriamiento y lubricación. Diseñe métodos de distribución del fluido de corte a la zona de corte y analice las ventajas y desventajas de su diseño.

22.53 Liste las preocupaciones que tendría usted si necesitara una máquina económica de polímeros de fibra de carbono reforzado o de compuestos de matriz metálica con fibras de grafito en una matriz de aluminio.

Procesos de maquinado: torneado y producción de orificios

CAPÍTULO 23

- Con los dos capítulos anteriores como antecedente, en éste se describen procesos de maquinado capaces de generar formas redondas externas o internas.
- La máquina herramienta de uso más común para dichas operaciones es el torno, del cual existen varios tipos y sistemas automatizados.
- Por lo anterior, se describe con detalle la amplia variedad de operaciones que se pueden efectuar en los tornos, como el torneado, taladrado, perfilado, refrentado, ranurado, corte de roscas y moleteado.
- En el capítulo también se describen operaciones como el mandrinado, taladrado, rimado y hechura de cuerdas internas (machuelado), así como las características de las máquinas herramientas asociadas con estos procesos.

Partes que es común manufacturar: componentes de maquinaria; monobloques y cabezales de motor; partes con formas complejas, tolerancias cerradas, buen acabado superficial y partes con roscas externas e internas.

Procesos alternativos: fundición de precisión, metalurgia de polvos, moldeo con inyección de polvos, maquinado abrasivo, rolado de roscas y estampado rotativo.

23.1 Introducción

Este capítulo describe procesos de maquinado que tienen la capacidad de producir partes cuya forma es básicamente redonda. Los productos comunes así elaborados son muy pequeños, como tornillos miniatura para las bisagras de los armazones de anteojos, o muy grandes, como los ejes de turbinas para plantas hidroeléctricas y rodillos de trituradoras.

Uno de los procesos fundamentales es el **torneado**, que significa que la parte gira mientras se maquina. El material en bruto por lo general es una pieza de trabajo que ha sido elaborada con otros procesos: fundición, forjado, extrusión, corte o metalurgia de polvos, como se describe en las partes II y III. Los torneados, que se suelen efectuar en un **torno** o con *máquinas herramienta* similares, se ilustran en la figura 23.1 y en la tabla 23.1. Estas máquinas son muy versátiles y capaces de realizar varias operaciones de maquinado que producen una amplia variedad de formas, como:

- **Torneado:** para producir piezas de trabajo rectas, cónicas, curvas o ranuradas (figuras 23.1a a d), como cigüeñales, ejes y pernos.
- **Refrentado (careado):** para producir una superficie plana al final de la parte y perpendicular a su eje (figura 23.1e); partes que se ensamblan con otros componentes; ranurado de cara para aplicaciones como asientos de anillos de retención (O-ring) (figura 23.1f).

23.1	Introducción	625
23.2	Torneado	628
23.3	Tornos y operaciones en tornos	636
23.4	Mandrinado y máquinas para mandrinar	651
23.5	Taladrado, brocas y taladros	652
23.6	Rimado y rimas	661
23.7	Machuelado y machuelos	662

EJEMPLOS:

23.1	Tasa de remoción de material y fuerza de corte en el torneado	636
23.2	Partes comunes elaboradas en tornos de CNC	643
23.3	Maquinado de formas complejas	644
23.4	Tasa de remoción de material y par en el taladrado	657

CASOS DE ESTUDIO:

23.1	Maquinado de frenos de disco	635
23.2	Retenedor para tornillo en hueso	663

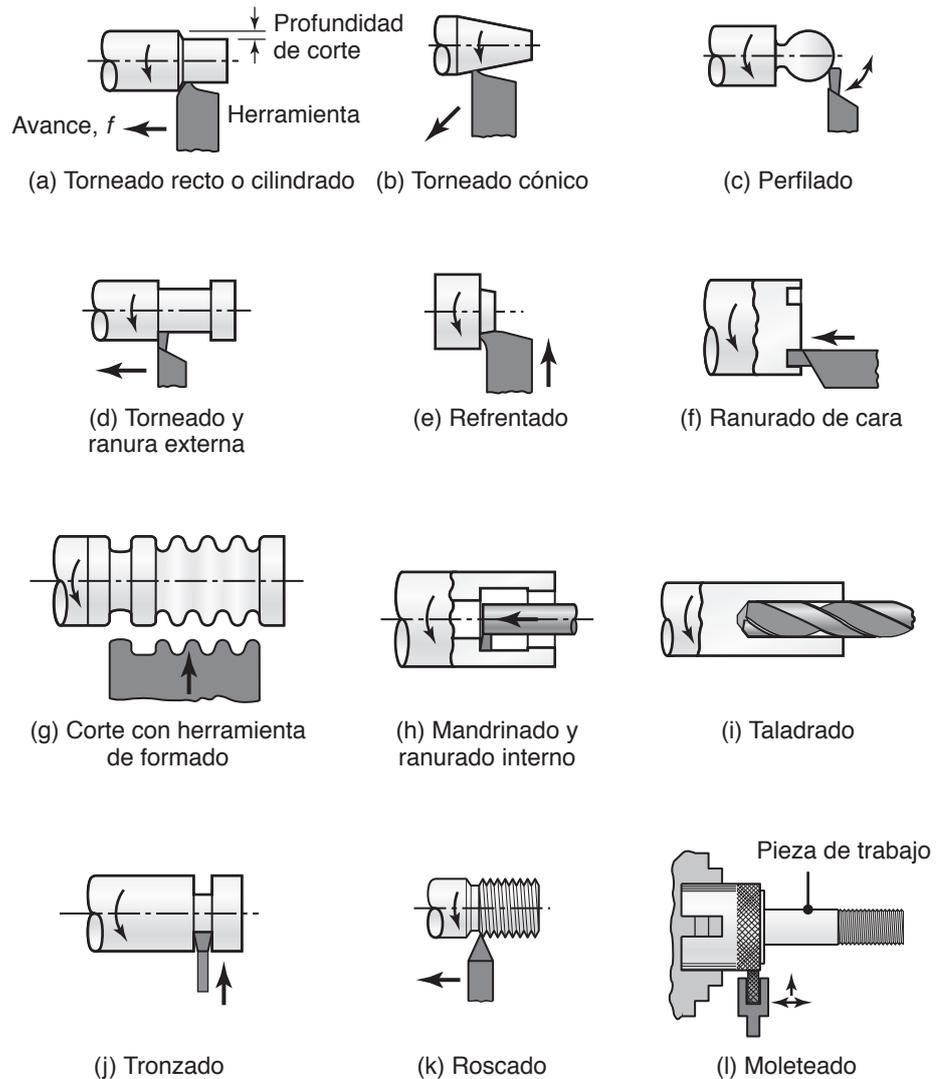


FIGURA 23.1 Operaciones diversas que se efectúan en un torno; observe que todas las partes son circulares. En este capítulo se describen las herramientas que se usan, su forma y los parámetros de procesamiento.

- **Corte con herramientas de formado:** (figura 23.1g) para producir varias formas con simetría axial para propósitos funcionales o estéticos.
- **Mandrinado:** para agrandar un orificio o cavidad cilíndrica hecha con un proceso previo o para producir ranuras internas circulares (figura 23.1h).
- **Taladrado:** para producir un orificio (figura 23.1i), al cual después le puede seguir el mandrinado para mejorar su exactitud dimensional y acabado de la superficie.
- **Corte:** llamado también **tronzado**, para remover un trozo del extremo de una parte, como se hace en la producción de tramos de material o material en bruto para su procesamiento adicional en productos discretos (figura 23.1j).
- **Roscado:** para producir roscas externas o internas (figura 23.1k).
- **Moleteado:** para producir una rugosidad de forma regular en superficies cilíndricas, como en la fabricación de picaportes y manijas (figura 23.1l).

TABLA 23.1

Características generales de los procesos de maquinado y tolerancias dimensionales comunes		
Proceso	Características	Tolerancias dimensionales comunes, ±mm (pulg)
Torneado	Operaciones de torneado y refrentado en todos los tipos de materiales, usa herramientas de un solo punto o herramientas de formado; los tornos manuales requieren mano de obra especializada; baja tasa de producción (aunque de media a alta con tornos de torreta y máquinas automáticas) que requiere mano de obra menos especializada.	Fino: 0.025-0.13 (0.001-0.005) Gruoso: 0.13 (0.005)
Mandrinado	Superficies o perfiles internos con características similares al torneado; es importante la rigidez de la barreta de mandrinado (buril de mandrinado) para evitar el traqueteo.	0.025 (0.001)
Taladrado	Perforaciones de varios tamaños y profundidades; tasa elevada de producción; el requerimiento de mano de obra especializada depende de la ubicación del barreno y de la exactitud establecida; requiere de mandrinado y rimado para mejorar la exactitud dimensional.	0.075 (0.003)
Fresado	Gran variedad de formas que involucran contornos, superficies planas y ranuras; versátil; tasa de producción de baja a media; requiere mano de obra especializada.	0.13-0.25 (0.005-0.01)
Cepillado (en cepillo de mesa)	Superficies planas grandes y perfiles de contorno recto sobre grandes piezas de trabajo, baja cantidad de producción, la necesidad de mano de obra especializada depende de la forma de la parte.	0.08-0.13 (0.003-0.005)
Cepillado (en cepillo de codo)	Superficies planas y perfiles de contorno recto en piezas de trabajo relativamente pequeñas; baja cantidad de producción; el requerimiento de mano de obra especializada depende de la forma de la parte.	0.05-0.13 (0.002-0.003)
Brochado	Superficies externas e internas, ranuras y contornos; buen acabado de la superficie; herramientas costosas; alta tasa de producción, la necesidad de mano de obra especializada depende de la forma de la parte.	0.025-0.15
Aserrado	Cortes rectos y de contorno sobre formas planas o estructurales; no es adecuado para materiales duros a menos que la sierra tenga dientes de carburo o esté recubierta con diamante; baja tasa de producción; la mano de obra por lo general es poco especializada.	0.8

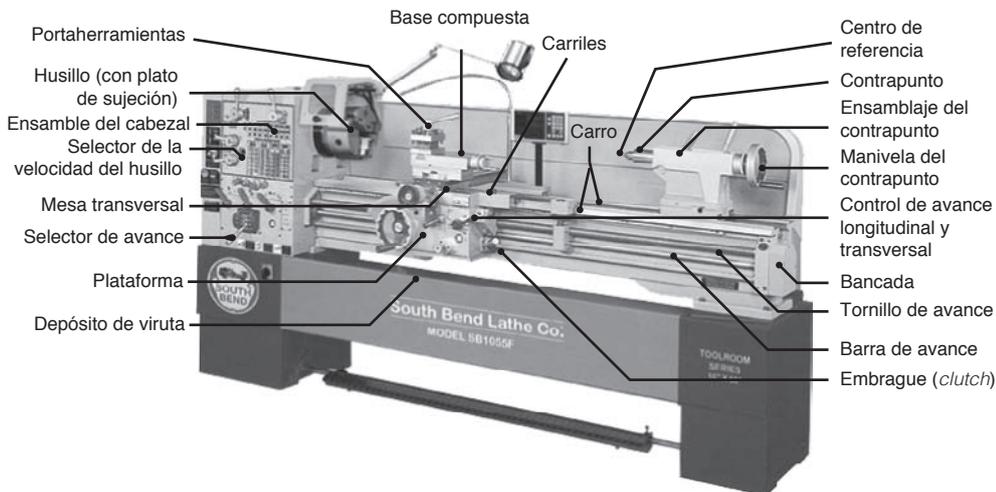
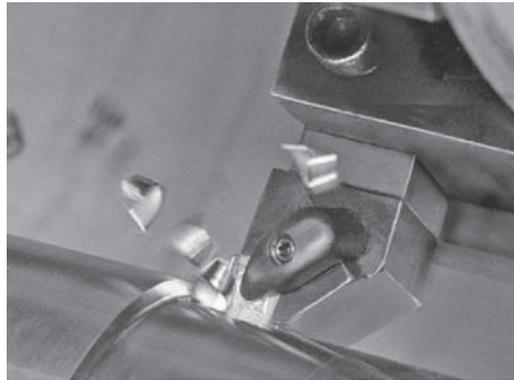
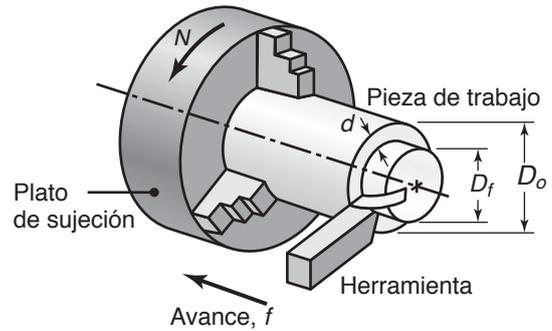


FIGURA 23.2 Vista general de un torno común donde se aprecian varios de sus componentes. Fuente: Cortesía de South Bend Lathe Co.

Las operaciones de corte resumidas anteriormente se llevan a cabo en un *torno* (figura 23.2), el cual está disponible en una amplia variedad de diseños, tamaños, capacidades y características controladas por computadora, como se describe en la sección 23.3 y el capítulo 25. Como se aprecia en las figuras 21.2 y 21.3, el torneado se efectúa a varias (a) velocidades de giro, N , de la pieza de trabajo sujeta en el husillo, (b) profundidades de corte, d , y (d) avances, f , que dependen de la pieza de trabajo y los materiales de la herra-



(a)



(b)

FIGURA 23.3 (a) Operación de torneado que muestra el inserto y la remoción de virutas; en esta fotografía la máquina herramienta avanza de derecha a izquierda. (b) Ilustración esquemática de la operación básica de torneado que muestra la profundidad de corte, d ; el avance, f , y la velocidad de rotación del eje, N , en rev/min. La velocidad de corte es la velocidad de la superficie de la pieza de trabajo en el extremo de la herramienta. Fuente: (a) Cortesía de Kennametal, Inc.



Código QR 23.1 Torneado con un inserto limpiador. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

mienta de corte, del acabado de la superficie y de la exactitud dimensional requerida, así como de las características de la máquina herramienta.

Este capítulo describe los parámetros de los procesos de torneado, herramientas de corte, capacidades del proceso y características de las máquinas herramienta que se usan para producir una variedad de partes con formas redondas. También se mencionan las consideraciones de diseño necesarias para mejorar la productividad de cada grupo de procesos.

23.2 Torneado

La mayoría de operaciones rotatorias involucran el uso de herramientas de corte de un solo punto, con la geometría de la herramienta de corte común de mano derecha que se ilustra en las figuras 21.10 y 23.4. Como puede verse, dichas herramientas se describen con una nomenclatura estandarizada. Cada grupo de materiales de la pieza de trabajo tiene un conjunto óptimo de ángulos para la herramienta, los cuales se han llegado a conocer en gran medida por la experiencia de muchos años (tabla 23.2).

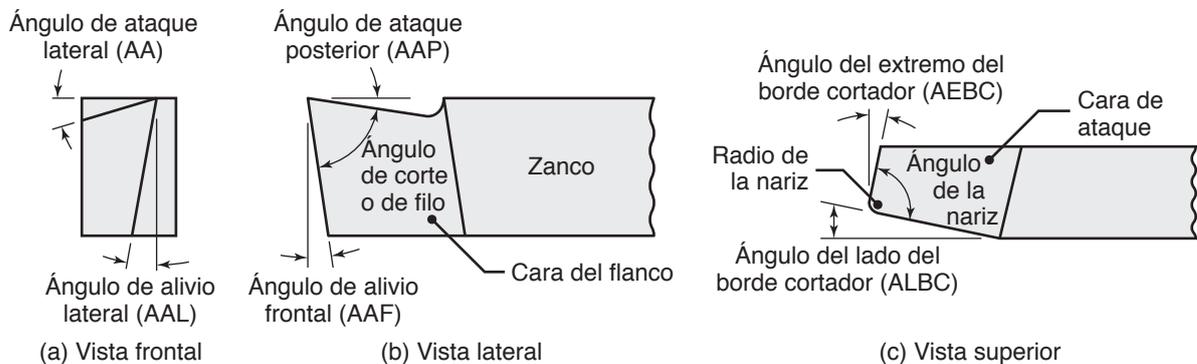


FIGURA 23.4 Denominaciones para una herramienta de corte de mano derecha, lo que significa que viaja de derecha a izquierda, como se ilustra en la figura 23.3b.

TABLA 23.2

Recomendaciones generales para los ángulos de la herramienta en el torneado										
Material	Acero de alta velocidad					Insertos de carburo				
	Ataque posterior	Ataque lateral	Alivio frontal	Alivio lateral	Borde cortador lateral y frontal	Ataque posterior	Ataque lateral	Alivio frontal	Alivio lateral	Borde cortador lateral y frontal
Aluminio y aleaciones de magnesio	20	15	12	10	5	0	5	5	5	15
Aleaciones de cobre	5	10	8	8	5	0	5	5	5	15
Aceros	10	12	5	5	15	-5	-5	5	5	15
Aceros inoxidables	5	8-10	5	5	15	-5-0	-5-5	5	5	15
Aleaciones de alta temperatura	0	10	5	5	15	5	0	5	5	45
Aleaciones refractarias	0	20	5	5	5	0	0	5	5	15
Aleaciones de titanio	0	5	5	5	15	-5	-5	5	5	5
Hierros fundidos	5	10	5	5	15	-5	-5	5	5	15
Termoplásticos	0	0	20-30	15-20	10	0	0	20-30	15-20	10
Termofijos	0	0	20-30	15-20	10	0	15	5	5	15

En el capítulo 21 se describieron los parámetros importantes del proceso que tienen influencia directa en los procesos de maquinado y la importancia de controlar dichos parámetros para optimizar la productividad. Esta sección describe parámetros importantes de los procesos rotatorios, como la geometría de la herramienta y la tasa de remoción de material, y proporciona datos para las prácticas recomendables de corte, entre ellos los materiales de la herramienta de corte, la profundidad de corte, el avance, la velocidad de corte y el uso de fluidos de corte.

Geometría de la herramienta. Los diferentes ángulos en una herramienta de corte de un solo punto tienen funciones importantes en las operaciones de maquinado. Estos ángulos se miden en un sistema de coordenadas que consiste en tres ejes principales del zanco de la herramienta, como se aprecia en la figura 23.4.

- El **ángulo de ataque** es importante para controlar tanto la dirección del flujo de la viruta como la resistencia del extremo de la herramienta. Los ángulos de ataque positivos mejoran la operación de corte por medio de reducir las fuerzas y las temperaturas, pero también generan un pequeño ángulo inclinado del extremo de la herramienta (vea las figuras 21.3 y 23.4), lo que posiblemente lleve al astillado y falla prematura de la herramienta en función de la dureza del material de ésta.
- El **ángulo de ataque lateral** es más importante que el **ángulo de ataque posterior**, los cuales por lo general controlan la dirección de flujo de la viruta; es común que estos ángulos estén en el rango de -5° a 5° .
- El **ángulo de borde de corte** afecta en diversos grados la formación de viruta, la resistencia de la herramienta y las fuerzas de corte; de forma general, este ángulo es cercano a los 15° .
- El **ángulo de alivio** controla la interferencia y la fricción en la interfase herramienta-pieza de trabajo. Si es demasiado grande, el extremo de la herramienta puede astillarse; si es muy pequeño, el desgaste en el flanco puede ser excesivo. Los ángulos de alivio por lo general son de 5° .
- El **radio de nariz** afecta el acabado de la superficie y la resistencia del extremo de la herramienta. Cuanto más pequeño es el radio de la nariz (lo que significa una herramienta afilada), más burdo es el acabado de la superficie de la pieza de trabajo y menor es la resistencia de la herramienta; sin embargo, un radio grande de nariz puede llevar al *traqueteo* de la herramienta, como se describe en la sección 25.4.

Tasa de remoción de material. La *tasa de remoción de material* (MRR, por sus siglas en inglés) es el volumen de material removido por unidad de tiempo en unidades de mm^3/min o pulg^3/min . En relación con las figuras 21.2 y 23.3, observe que para cada revolución de la pieza de trabajo se retira una capa de material en forma de anillo, la cual tiene un área transversal que es igual al producto de la distancia que recorre la herramienta en

una revolución (avance, f) y la profundidad de corte, d . El volumen de este anillo es el producto del área de la sección transversal, es decir, $(f)(d)$, y la circunferencia promedio del anillo, πD_{prom} , donde

$$D_{\text{prom}} = \frac{D_o + D_f}{2}.$$

Para cortes ligeros, en piezas de trabajo de diámetro grande, el diámetro promedio puede sustituirse con D_o .

La velocidad rotacional de la pieza de trabajo es N y la tasa de remoción de material por revolución es $(\pi)(D_{\text{prom}})(d)(f)$. Como se giran N revoluciones por minuto, la tasa de remoción es

$$\text{MRR} = \pi D_{\text{prom}} dfN. \quad (23.1)$$

Observe que la ecuación anterior también puede escribirse como

$$\text{MRR} = dfV, \quad (23.2)$$

donde V es la velocidad de corte y la tasa de remoción de material MRR tiene las mismas unidades de mm^3/min .

El tiempo de corte, t , para una pieza de trabajo de longitud l puede calcularse si se observa que la herramienta se mueve con una velocidad de avance de fN , en unidades de $(\text{mm}/\text{rev})(\text{rev}/\text{min}) = \text{mm}/\text{min}$. Como la distancia recorrida es l mm, el tiempo de corte es

$$t = \frac{l}{fN}. \quad (23.3)$$

Las ecuaciones anteriores y la terminología se resumen en la tabla 23.3. El tiempo de corte en la ecuación (23.3) no incluye el tiempo requerido para *acercar y alejar la herramienta*. Debido a que el tiempo dedicado a los periodos en los que no hay corte en una operación de maquinado es improductivo, lo cual tiene efectos perjudiciales en el costo total, el tiempo dedicado a acercar y alejar las herramientas a la pieza de trabajo es de considerable importancia. Las máquinas herramienta están diseñadas y construidas para minimizar dicho tiempo. Un método para lograrlo es mover *rápidamente* las herramientas durante los periodos sin corte, seguido por un movimiento *lento* cuando la herramienta se aproxima a la pieza de trabajo.

Fuerzas en el torneado. En la figura 23.5 se ilustran las tres principales fuerzas que actúan sobre una herramienta cortadora en el torneado. Estas fuerzas son importantes en el diseño de las máquinas herramienta, así como en la deflexión de las herramientas y piezas de trabajo, sobre todo en operaciones de maquinado de precisión (vea la sección 25.7). Es esencial que la máquina herramienta y sus componentes sean capaces de manejar estas fuerzas sin sufrir deflexiones, vibraciones o movimientos significativos durante toda la operación de maquinado.

La **fuerza de corte**, F_c , actúa hacia abajo sobre el extremo de la herramienta, por lo que tiende a doblar ésta hacia abajo y a la pieza de trabajo hacia arriba. La fuerza de corte suministra la energía requerida para la operación de corte y puede calcularse con los datos dados en la tabla 21.2 a partir de la energía por unidad de volumen, descrita en la sección 21.3. El producto de la fuerza de corte por su distancia a partir del centro de la pieza de trabajo determina el *torque* sobre el husillo. El producto del torque por la velocidad del husillo, entonces, determina la *potencia* requerida en la operación rotatoria.

La **fuerza de empuje**, F_t , actúa en dirección longitudinal; también se denomina **fuerza de avance** porque está en la dirección del avance de la herramienta. En la figura 23.5, esta fuerza tiende a empujar la herramienta hacia la derecha y fuera del plato de sujeción. La **fuerza radial**, F_r , actúa en la dirección radial y tiende a empujar la herramienta fuera de la pieza de trabajo. Debido a los diversos factores involucrados en el proceso de corte, las fuerzas F_t y F_r son difíciles de calcular directamente y, por lo general, se determinan experimentalmente.

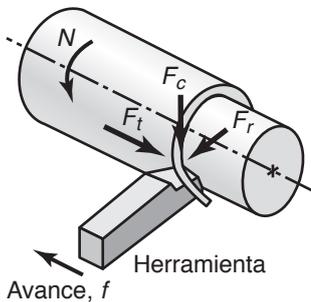


FIGURA 23.5 Fuerzas que actúan sobre una herramienta de corte durante el proceso rotatorio. F_c es la fuerza de corte, F_t es el empuje o fuerza de avance (en la dirección del avance) y F_r es la fuerza radial que tiende a empujar la herramienta fuera de la pieza de trabajo que se maquina.

TABLA 23.3

Resumen de parámetros y fórmulas para el torneado

- N = Velocidad rotacional de la pieza de trabajo, rpm.
- f = Avance, mm/rev o pulg/rev.
- v = Velocidad de avance, o velocidad lineal de la herramienta a lo largo de la longitud de la pieza de trabajo, mm/min o pulg/min.
= fN .
- V = Velocidad superficial de la pieza de trabajo, m/min o pies/min.
= $\pi D_o N$ (para la máxima velocidad).
= $\pi D_{prom} N$ (para la velocidad promedio).
- l = Longitud de corte, mm o pulg.
- D_o = Diámetro original de la pieza de trabajo, mm o pulg.
- D_f = Diámetro final de la pieza de trabajo, mm o pulg.
- D_{prom} = Diámetro promedio de la pieza de trabajo, mm o pulg.
= $(D_o + D_f)/2$.
- d = Profundidad de corte, mm o pulg.
= $(D_o - D_f)/2$.
- t = Tiempo de corte, s o min.
= l/fN .
- MRR = mm³/min o pulg³/min.
= $\pi D_{prom} d f N$.
- Torque = N-m o lb-pies.
= $F_c D_{prom}/2$.
- Potencia = kW o hp.
= (torque)(ω), donde $\omega = 2\pi N$ rad/min.

Nota: Las unidades dadas son las que se usan comúnmente; en las fórmulas deben usarse y comprobarse las unidades apropiadas.



Código QR 23.2 Cortes de desbaste y acabado en el torneado. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

Cortes de desbaste y de acabado. En el maquinado, el procedimiento usual es primero realizar uno o más *cortes de desbaste*, por lo común a tasas de avance elevadas y grandes profundidades de corte; entonces, las tasas de remoción de material son grandes y se hace poca consideración de la tolerancia dimensional y la rugosidad de la superficie de la pieza de trabajo. Estos cortes son seguidos después por un *corte de acabado*, efectuado por lo general con un avance menor y una profundidad pequeña de corte con objeto de producir un buen acabado en la superficie.

Materiales de la herramienta, avances y velocidades de corte. Las características generales de los materiales de la herramienta cortadora se describieron en el capítulo 22. En la figura 23.6 se presenta un rango amplio de velocidades de corte y avances aplicables para estos materiales, las cuales sirven como lineamiento general en las operaciones rotatorias. En la tabla 23.4 se presentan recomendaciones específicas acerca de los parámetros de las operaciones rotatorias para diferentes materiales de la pieza de trabajo y herramientas de corte. Dichas recomendaciones se basan en datos experimentales, con el empleo de arreglos estandarizados de las operaciones rotatorias. En la práctica no es raro que se excedan dichos valores, en especial con el empleo de fluidos de corte efectivos y un proceso bien controlado.

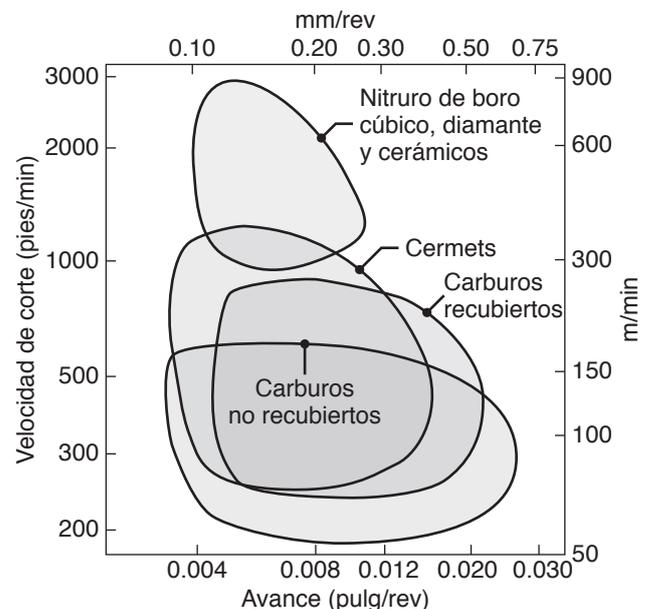


FIGURA 23.6 Rango de velocidades de corte y avances aplicables para varios materiales de la herramienta.

TABLA 23.4

Recomendaciones generales para operaciones de torneado (sólo son una guía, en la práctica es frecuente que se excedan)							
Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte	Condiciones iniciales para uso general			Rango para desbaste y acabado		
		Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)	Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)
Aceros bajos en C de maquinado libre	Carburo no recubierto	1.5-6.3 (0.06-0.25)	0.35 (0.014)	90 (300)	0.5-7.6 (0.02-0.30)	0.15-1.1 (0.006-0.045)	60-135 (200-450)
	Carburo recubierto con cerámico	"	"	245-275 (800-900)	"	"	180-495 (590-1600)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	185-200 (600-650)	"	"	90-245 (300-800)
	Carburo recubierto con TiN	"	"	105-150 (350-500)	"	"	60-230 (200-750)
	Cerámico Al ₂ O ₃	"	0.25 (0.010)	395-440 (1300-1450)	"	"	365-550 (1200-1800)
	Cermet	"	0.30 (0.012)	215-290 (700-950)	"	"	180-455 (590-1500)
Aceros medios y altos en C	Carburo no recubierto	1.2-4.0 (0.05-0.20)	0.30 (0.012)	74 (250)	2.5-7.6 (0.10-0.30)	0.15-0.75 (0.006-0.03)	135-225 (440-725)
	Carburo recubierto con cerámico	"	"	185-230 (600-750)	"	"	120-410 (400-1350)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	120-150 (400-500)	"	"	75-215 (250-700)
	Carburo recubierto con TiN	"	"	90-200 (300-650)	"	"	45-215 (150-700)
	Cerámico Al ₂ O ₃	"	0.25 (0.010)	335 (1100)	"	"	245-455 (800-1500)
	Cermet	"	0.25 (0.010)	170-245 (550-800)	"	"	105-305 (350-1000)
Hierro fundido, hierro gris	Carburo no recubierto	1.25-6.3 (0.05-0.25)	0.32 (0.013)	90 (300)	0.4-12.7 (0.015-0.5)	0.1-0.75 (0.004-0.03)	75-185 (250-600)
	Carburo recubierto con cerámico	"	"	200 (650)	"	"	120-365 (400-1200)
	Carburo recubierto con TiN	"	"	90-135 (300-450)	"	"	60-215 (200-700)
	Cerámico Al ₂ O ₃	"	0.25 (0.010)	455-490 (1500-1600)	"	"	365-855 (1200-2800)
	Cerámico SiN	"	0.32 (0.013)	730 (2400)	"	"	200-990 (650-3250)
	BNc policristalino	"	"	1000 (3290)	"	"	200-1160 (650-3800)

Acero inoxidable, austenítico	Carburo con triple recubrimiento	1.5-4.4 (0.06-0.175)	0.35 (0.014)	150 (500)	0.5-12.7 (0.02-0.5)	0.08-0.75 (0.003-0.03)	75-230 (250-750)
	Carburo recubierto con TiN	"	"	85-160 (275-525)	"	"	55-200 (175-650)
	Cermet	"	0.30 (0.012)	185-215 (600-700)	"	"	135-315 (450-1000)
Aleaciones de alta temperatura, basadas en níquel	Carburo no recubierto	2.5 (0.10)	0.15 (0.006)	25-45 (75-150)	0.25-6.3 (0.01-0.25)	0.1-0.3 (0.004-0.012)	15-30 (50-100)
	Carburo recubierto con cerámico	"	"	45 (150)	"	"	20-60 (65-200)
	Carburo recubierto con TiN	"	"	30-55 (95-175)	"	"	20-85 (60-275)
	Cerámico Al ₂ O ₃	"	"	260 (850)	"	"	185-395 (600-1300)
	Cerámico SiN	"	"	215 (700)	"	"	90-215 (300-700)
	BNc policristalino	"	"	150 (500)	"	"	120-185 (400-600)
Aleaciones de titanio	Carburo no recubierto	1.0-3.8 (0.04-0.15)	0.15 (0.006)	35-60 (120-200)	0.25-6.3 (0.01-0.25)	0.1-0.4 (0.004-0.015)	10-75 (30-250)
	Carburo recubierto con TiN	"	"	30-60 (100-200)	"	"	15-170 (50-550)
Aleaciones de aluminio de maquinado libre	Carburo no recubierto	1.5-5.0 (0.06-0.20)	0.45 (0.018)	490 (1600)	0.25-8.8 (0.01-0.35)	0.08-0.62 (0.003-0.025)	200-670 (650-2000)
	Carburo recubierto con TiN	"	"	550 (1800)	"	"	60-915 (200-3000)
	Cermet	"	"	490 (1600)	"	"	215-795 (700-2600)
	Diamante policristalino	0.1-4.0	0.1-0.4	760 (2500)	"	"	1000-5000 (3200-16,250)
Alto contenido de silicio							
	Diamante policristalino	"	"	530 (1700)	"	"	365-915 (1200-3000)

(continúa)

TABLA 23.4 (continuación)

		Condiciones iniciales para uso general			Rango para desbaste y acabado		
		Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)	Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)
Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte						
Aleaciones de cobre	Carburo no recubierto	1.5-5.0 (0.06-0.20)	0.25 (0.010)	260 (850)	0.4-7.51 (0.015-0.3)	0.15-0.75 (0.006-0.03)	105-535 (350-1750)
	Carburo recubierto con cerámico	"	"	365 (1200)	"	"	215-670 (700-2200)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	215 (700)	"	"	90-305 (300-1000)
	Carburo recubierto con TiN	"	"	90-275 (300-900)	"	"	45-455 (150-1500)
	Cermet	"	"	245-425 (800-1400)	"	"	200-610 (650-2000)
	Diamante policristalino	"	"	520 (1700)	0.05-2.0	0.03-0.3	400-1300 (1300-4200)
Aleaciones de tungsteno	Carburo no recubierto	2.5 (0.10)	0.2 (0.008)	75 (250)	0.25-5.0 (0.01-0.2)	0.12-0.45 (0.005-0.018)	55-120 (175-400)
	Carburo recubierto con TiN	"	"	85 (275)	"	"	60-150 (200-500)
Termoplásticos y termofijos	Carburo recubierto con TiN	1.2 (0.05)	0.12 (0.005)	170 (550)	0.12-5.0 (0.005-0.20)	0.08-0.35 (0.003-0.015)	90-230 (300-750)
	Diamante policristalino	"	"	395 (1300)	"	"	250-730 (800-2400)
Compósitos, grafito reforzado	Carburo recubierto con TiN	1.9 (0.075)	0.2 (0.008)	200 (650)	0.12-6.3 (0.005-0.25)	0.12-1.5 (0.005-0.06)	105-290 (350-950)
	Diamante policristalino	"	"	760 (2500)	"	"	550-1310 (1800-4300)

Fuente: Basado en datos de Kennametal Inc.

Nota: Las velocidades de corte para herramientas de acero de alta velocidad son alrededor de la mitad de las correspondientes a carburos no recubiertos.

CASO DE ESTUDIO 23.1 Maquinado de frenos de disco

Un fabricante de frenos para automóvil produce discos de frenado (vea la figura 23.7) por medio de un refrentado en torno, siguiendo los parámetros de proceso que se muestran en la tabla 23.5. Los discos de freno se elaboran a partir de un fundido en bruto, maquinado en un torno, y después se producen en un taladro múltiple de CNC los barrenos de montaje en el eje y de enfriamiento en el disco. El material que se utiliza es hierro fundido gris (ASTM Clase 25, vea la tabla 12.4), se maquina usando un inserto de nitruro de silicio. Por desgracia, este material puede tener muy mala maquinabilidad debido a maduración insuficiente o variaciones en la composición. Además, se desea modificar las condiciones de corte para incrementar la tasa de producción.

Como materiales alternativos para la herramienta de corte se investigaron el óxido de aluminio (Al_2O_3) y el nitruro de boro cúbico policristalino (BNc). Como puede verse en la tabla 23.4, el BNc es el único material que permitiría una mayor velocidad de corte, en com-

paración con el SiN para el hierro fundido gris como pieza de trabajo. Con base en las recomendaciones de la tabla 23.4, se seleccionaron los parámetros de corte que aparecen en la tabla 23.5.

Con el inserto de BNc se vio que la vida de la herramienta podría incrementarse en forma notable a 4200 discos por borde de la herramienta, en comparación con sólo 40 con el nitruro de silicio, de modo que el costo más alto del BNc también podría justificarse económicamente. Además, debido a la vida más larga, el tiempo para cambiar la herramienta se reducía mucho y la utilización de la máquina aumentaba de 82 a 94%. Así, el cambio a nitruro de boro cúbico policristalino llevó a mejoras simultáneas en la economía y la tasa de producción. Estas mejoras tan grandes por lo general no se alcanzan, pero el hierro fundido gris es un material especialmente apto para la aplicación del BNc.

Fuente: Cortesía de Kennametal Inc.

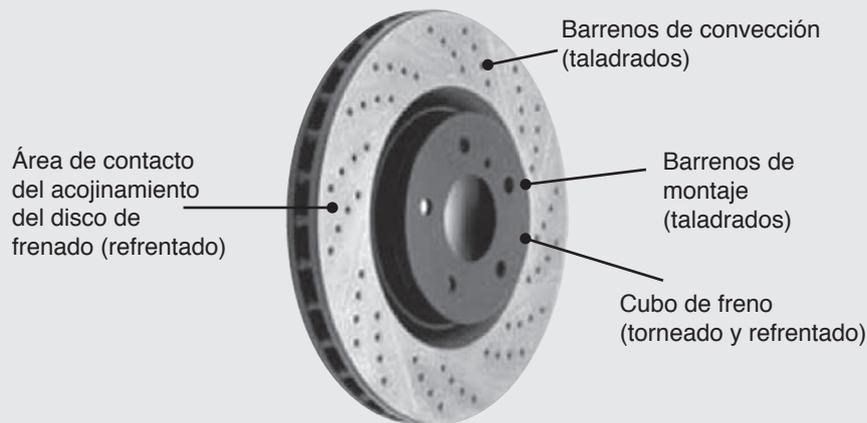


FIGURA 23.7 Freno de disco, para el caso de estudio 23.1.

TABLA 23.5

Comparación de los parámetros de procesamiento para herramientas de SiN y BNc para trabajar el refrentado de un freno de disco

Parámetro	Material de la herramienta de corte	
	SiN	BNc
Profundidad de corte, mm	1.5	2.0
Avance, mm/rev	0.5	0.4
Velocidad de corte, m/min	700	1000
Vida de la herramienta, partes	40	4200
Utilización de la máquina, %	82	94

Fluidos de corte. Muchos materiales metálicos y no metálicos pueden maquinarse sin un fluido de corte, pero en la mayoría de los casos la aplicación de alguno puede mejorar de manera significativa la operación. En la tabla 23.6 se dan recomendaciones generales para el uso de fluidos de corte apropiados para diferentes materiales de la pieza de trabajo. Sin embargo, recuerde la tendencia generalizada de los beneficios del maquinado casi seco y seco, como se describió en la sección 22.12.1.

EJEMPLO 23.1 Tasa de remoción de material y fuerza de corte en el torneado

Dado: Se está reduciendo a 0.480 pulgadas el diámetro de una barra de acero inoxidable 304 de 6 pulgadas de largo y 0.5 pulgadas de diámetro, por medio de un proceso de torneado. El husillo rota a $N = 400$ rpm y la herramienta se desplaza a una velocidad axial de 8 pulg/min.

Se solicita: Calcular la velocidad de corte, la tasa de remoción de material, tiempo de corte, potencia disipada y fuerza de corte.

Respuesta: La velocidad de corte es la velocidad tangencial de la pieza de trabajo. La máxima velocidad de corte ocurre en el diámetro exterior, D_o , y se obtiene de la ecuación,

$$V = \pi D_o N.$$

Entonces,

$$V = (\pi)(0.500)(400) = 628 \text{ pulg/min} = 52 \text{ pies/min.}$$

La velocidad de corte en el diámetro maquinado es

$$V = (\pi)(0.480)(400) = 603 \text{ pulg/min} = 50 \text{ pies/min.}$$

De la información dada, observe que la profundidad de corte es

$$d = \frac{0.500 - 0.480}{2} = 0.010 \text{ pulg.}$$

y el avance es

$$f = \frac{8}{400} = 0.02 \text{ pulg/rev.}$$

De acuerdo con la ecuación (23.1), la tasa de remoción de material es, entonces

$$\begin{aligned} \text{MRR} &= (\pi)(0.490)(0.010)(0.02)(400) \\ &= 0.12 \text{ pulg}^3/\text{min.} \end{aligned}$$

También se puede usar la ecuación (23.2), en cuyo caso encontramos que la $\text{MRR} = (0.010)(0.02)(52)(12) = 0.12 \text{ pulg}^3/\text{min}$. El tiempo real para cortar, de acuerdo con la ecuación (23.3), es

$$t = \frac{6}{(0.02)(400)} = 0.75 \text{ min.}$$

La potencia requerida se puede calcular en referencia con la tabla 21.2 y tomando un valor promedio para el acero inoxidable de $4 \text{ W-s/mm}^3 = 4/2.73 = 1.47 \text{ hp-min/pulg}^3$. Por tanto, la potencia disipada es

$$\text{Potencia} = (1.47)(0.123) = 0.181 \text{ hp.}$$

Como $1 \text{ hp} = 396\,000 \text{ pulg-lb/min}$, la potencia disipada es $71\,700 \text{ pulg-lb/min}$. La fuerza de corte, F_c , es la fuerza tangencial ejercida por la herramienta. La potencia es el producto del torque, T , y la velocidad rotacional en radianes por unidad de tiempo; entonces,

$$T = \frac{71\,700}{(2\pi)(400)} = 29 \text{ lb-pulg.}$$

El torque es $T = F_c D_{\text{prom}}/2$; por tanto,

$$F_c = \frac{29}{0.490/2} = 118 \text{ lb.}$$

23.3 Tornos y operaciones en tornos

Los *tornos* por lo general se consideran las máquinas herramienta más antiguas. Aunque tornos para trabajar madera se desarrollaron por primera vez durante el periodo de 1000 a 1 a. C., los tornos para el trabajo de metales, con husillos, se construyeron hacia fines del siglo XVIII. El torno más común se llamaba originalmente *torno de motor*, porque estaba impulsado por poleas y bandas elevadas que salían de un motor vecino instalado en el taller de la fábrica. Los tornos se equiparon por primera vez con motores eléctricos individuales a fines del siglo XIX.

La velocidad máxima del husillo de los tornos por lo general es de alrededor de 4000 rpm, pero para los tornos grandes puede ser de sólo 200 rpm. Para aplicaciones especiales las velocidades varían entre 10 000 y 40 000 rpm, o mayores para maquinado de muy alta velocidad (vea la sección 25.5). El costo de los tornos varía desde \$2000 dólares estadounidenses, para los de tipo banco, hasta más de \$100 000 para las unidades más grandes.

23.3.1 Componentes del torno

Los tornos están equipados con varios componentes y accesorios, como se ilustra en la figura 23.2. Sus características y funciones básicas son:

Bancada. La bancada es el soporte de todos los componentes principales del torno; tiene una masa grande y está construida rígidamente, por lo general de un hierro fundido gris o nodular (vea también la sección 25.3 acerca de nuevos materiales para estructuras de máquinas herramienta). La porción superior de la bancada tiene dos carriles, con varias secciones transversales endurecidas y maquinadas para que tengan resistencia al desgaste y una buena exactitud dimensional durante el proceso de torneado. En un *torno de bancada dividida* se puede retirar una sección de la bancada frente al cabezal para dar acomodo a piezas de trabajo de diámetro muy grande.

Carro. El carro, o *ensamblaje del carro*, se desliza a lo largo de los carriles y consiste en mesa *transversal*, *poste de herramientas* y *tablero*. La herramienta de corte está montada en el portaherramientas, por lo general con un soporte compuesto que gira para posicionar y ajustar la herramienta. La *mesa transversal* se mueve en forma radial hacia dentro y fuera, con lo que controla la posición radial de la herramienta de corte en operaciones como el refrentado (vea la figura 23.1e). El tablero está equipado con mecanismos para permitir el movimiento tanto manual como mecanizado del carro y del deslizador transversal por medio de un *tornillo sinfín*.

Cabezal. El cabezal está fijo a la bancada y está equipado con motores, poleas y bandas (correas) V que suministran potencia al *husillo* a varias velocidades rotacionales, las cuales se pueden establecer por medio de selectores controlados manualmente o con dispositivos eléctricos. La mayor parte de los cabezales están equipados con un conjunto de engranes y algunos tienen varios sincronizadores para dar un rango de *variación continua* de velocidad al husillo. Los cabezales tienen un husillo hueco sobre el que se montan accesorios que sujetan el trabajo (por ejemplo platos de *sujeción* o *boquillas*; vea la sección 23.3.2) y pueden alimentarse a través de ellos largas barras o tubos para diversas operaciones de torneado. La exactitud del husillo es importante para la precisión en el torneado, en particular en el maquinado de alta velocidad. Es común usar baleros precargados o rodamientos de bolas para soportar rígidamente al husillo.

Contrapunto. El contrapunto, que se puede deslizar a lo largo de los carriles y sujetarse en cualquier posición, da apoyo al otro extremo de la pieza de trabajo. Está equipado con un *centro*, que puede ser fijo (llamado *centro de referencia*) o tener libertad para rotar con la pieza de trabajo misma (*centro vivo*). En el cuerpo del *contrapunto* (pieza cilíndrica hueca con una perforación redonda) pueden montarse taladros y rimas (secciones 23.5 y 23.6) para perforar barrenos axiales en la pieza de trabajo.

Barra de avance y tornillo sinfín. La barra de avance es impulsada por un conjunto de engranes a través del cabezal. Rota durante la operación del torno y provee movimiento al carro y al deslizador transversal por medio de engranes, un embrague de fricción y una guía a lo largo de la barra. El cierre de una *tuerca bipartida* alrededor del tornillo sin fin une la barra con el carro. La tuerca bipartida también se utiliza para cortar roscas con exactitud.

TABLA 23.6

Recomendaciones generales para fluidos de corte en maquinado (vea también la sección 33.7)

Material	Tipo de fluido de corte
Aluminio	D, MO, E, CSN
Berilio	MO, E, CSN
Cobre	D, E, CSN
Magnesio	D, MO
Níquel	MO, E, CSN
Metales refractarios	MO, E, EP
Aceros	
Al carbono y de baja aleación	D, MO, E, CSN, EP
Inoxidable	D, MO, E, CSN
Titanio	CSN, EP, MO
Zinc	C, MO, E, CSN
Circonio	D, E, CSN

Nota: CSN = químico y sintético; D = seco; E = emulsión; EP = presión extrema; FO = aceite grasoso y MO = aceite mineral.

TABLA 23.7

Capacidades comunes y dimensiones máximas de la pieza de trabajo para máquinas herramienta			
Máquina herramienta	Dimensión máxima (m)	Potencia (kW)	Velocidad máxima (rpm)
Tornos (balanceo/longitud)			
De banco	0.3/1	<1	3000
De motor	3/5	70	12 000
Con torreta	0.5/1.5	60	6000
Máquinas de tornillo sin fin automático	0.1/0.3	20	10 000
Mandrinado (diámetro del trabajo/longitud)			
Husillo vertical	4/3	200	300
Husillo horizontal	1.5/2	70	2000
Taladros			
De bancada y de columna (diámetro de la broca)	0.1	10	12 000
Radial (columna a distancia al husillo)	3	—	—
Control numérico (recorrido de la mesa)	4	—	—

Nota: Hay capacidades mayores para aplicaciones especiales.

Especificaciones del torno. Por lo general un torno se especifica con los siguientes parámetros:

- Su *balanceo* (o radio de volteo), que es el diámetro máximo de la pieza de trabajo que puede recibir (tabla 23.7); puede ser de hasta 2 m (78 pulg).
- Distancia máxima entre el cabezal y los centros del contrapunto.
- Longitud de la bancada.

23.3.2 Dispositivos y accesorios de sujeción

Los dispositivos de *sujeción de la pieza de trabajo* son importantes, ya que deben sostener la pieza con seguridad en su lugar. Como se muestra en la figura 23.3, un extremo de la pieza de trabajo se sujeta al husillo del torno por medio de un plato de sujeción, boquilla (vea la figura 23.8d), o portabrocas.

Un **plato de sujeción** suele estar equipado con tres o cuatro *mordazas*. Los platos de *tres mordazas* generalmente tienen un diseño de desplazamiento con engranes que hace que las mordazas se autocentren. Se usan para piezas de trabajo redondas, como barras, tubos y tubería, y por lo común pueden centrarse hasta 0.025 mm (0.001 pulg). En los platos de sujeción de *cuatro mordazas* éstas se pueden mover y ajustar independientemente una de la otra; así, por ejemplo, se usan para piezas de trabajo cuadradas, rectangulares o irregulares. Las mordazas de ciertos tipos de platos se pueden invertir para sujetar piezas de trabajo huecas, como tubos y tuberías, tanto por la superficie exterior como por la interior. También existen mordazas hechas de acero al bajo carbono (llamadas *mordazas suaves*) que se pueden maquinar en las formas deseadas. Por su baja resistencia y dureza, las mordazas suaves se adaptan a las pequeñas irregularidades de las piezas de trabajo, lo que da como resultado una mejor sujeción. Los platos de sujeción se pueden *accionar manualmente o de forma automática* por medio de la llave de plato.

Los **platos de sujeción de potencia** son activados por medios neumáticos o hidráulicos, se usan en equipo automatizado para altas tasas de producción, incluso en la carga de partes mediante robots industriales (sección 37.6). También están disponibles varios tipos de platos de sujeción de potencia con mecanismos de palanca o tipo cuña, que se utilizan para activar las mordazas. Hay platos de sujeción en varios diseños y tamaños. Su selección depende del tipo y velocidad de operación, tamaño de la pieza de trabajo, requerimientos de producción y de exactitud dimensional, así como de las fuerzas de sujeción necesarias en las mordazas. Al controlar la magnitud de las fuerzas en las mordazas, un operador puede asegurar que la parte no se deslice en el plato de sujeción durante el maquinado. Las altas velocidades del husillo pueden reducir de manera significativa la fuerza en las mordazas debido al efecto de las *fuerzas centrífugas*.

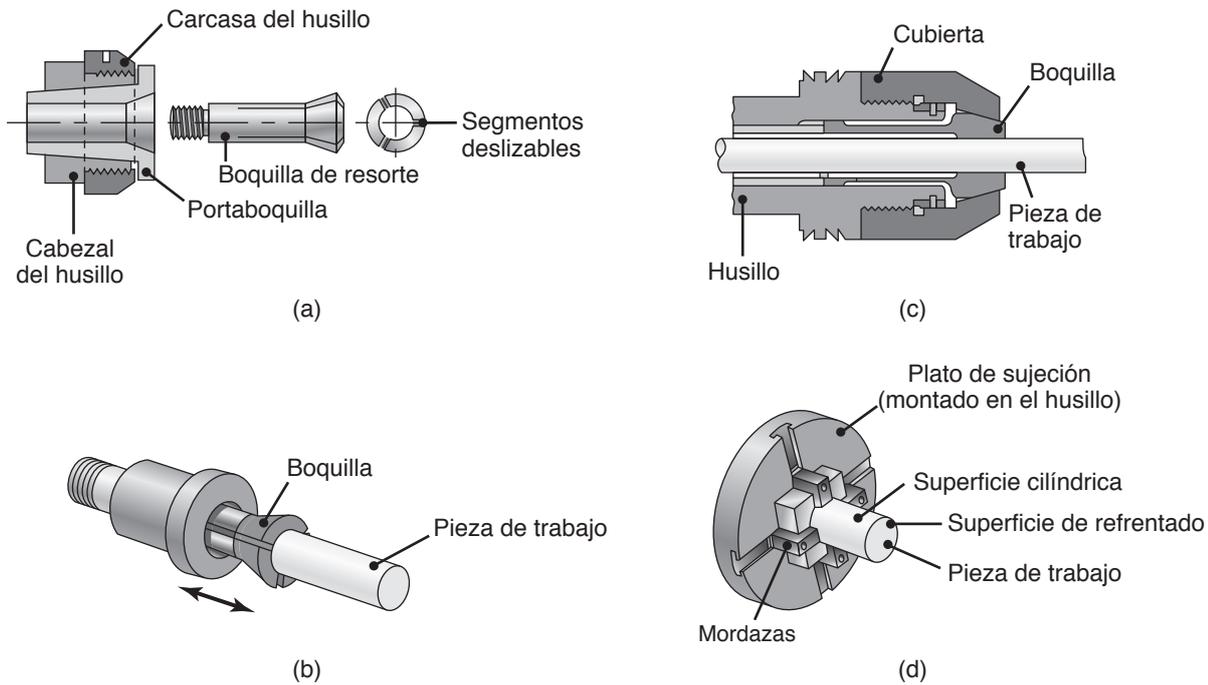


FIGURA 23.8 (a) y (b) Ilustraciones esquemáticas de un sujetador tipo boquilla. La pieza de trabajo se coloca en el barreno del sujetador y las superficies cónicas de éste son forzadas hacia dentro al empujarlas con una barra al interior de la carcasa. (c) Sujetador de tipo empuje. (d) Sujeción de una pieza de trabajo en un plato.

Una **boquilla** es básicamente un casquillo cónico seccionado longitudinalmente. La pieza de trabajo, por lo general con un diámetro máximo de una pulgada, se coloca dentro de la boquilla y después se tira de ésta (*sujetador interno*; figuras 23.8a y b) o bien se empuja (*sujetador de empuje*; figura 23.8c) mecánicamente hacia el husillo. Las superficies ahusadas contraen radialmente los segmentos de la boquilla, provocando que se estrechen contra la pieza de trabajo. Las boquillas se usan para piezas de trabajo redondas así como para otras formas. Una ventaja de usar una boquilla, en lugar de un plato de sujeción de tres o cuatro mordazas, es que la boquilla sujeta casi toda la circunferencia de la parte, lo que hace que el dispositivo sea particularmente apropiado para partes con secciones transversales pequeñas.

Los **platos de sujeción** se emplean para sujetar piezas de trabajo de forma irregular; son redondos y tienen varias ranuras y perforaciones a través de los cuales se atornilla o sujeta con mordazas la pieza de trabajo (figura 23.8d). Los **mandriles** (figura 23.9) se

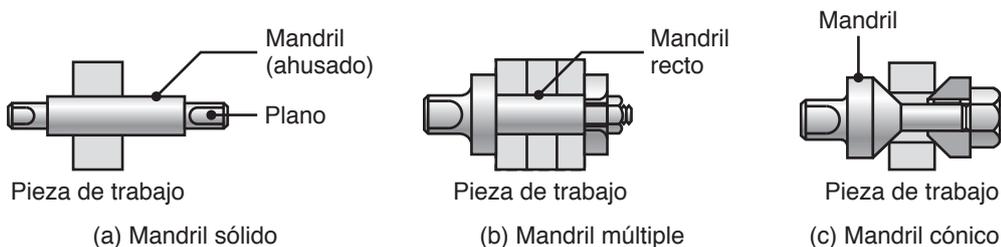


FIGURA 23.9 Varios tipos de mandriles para sujetar piezas de trabajo para su torneado; estos mandriles suelen estar montados entre los centros de un torno. Observe que en (a) puede maquinarse tanto la cara cilíndrica como la del extremo de la pieza de trabajo, en tanto que en (b) y (c) sólo pueden maquinarse las superficies cilíndricas.

colocan dentro de piezas de trabajo huecas o tubulares y se usan para sujetar piezas de trabajo que requieren maquinado en ambos extremos o en sus superficies cilíndricas.

Accesorios. Existen varios equipos en forma de accesorios y complementos para tornos. Entre ellos están los siguientes:

- Topes del carro y del deslizador transversal, en varios diseños, para detener el carro a una distancia predeterminada a lo largo de la bancada.
- Equipos para girar partes que tienen varios ahusamientos.
- Diversos accesorios para fresar, brochar, taladrar, hacer roscas, cortar engranes, tronzar y rectificar o esmerilar.

23.3.3 Operaciones en el torno

En una operación rotacional común, la pieza de trabajo se sujeta por medio de alguno de los equipos de sujeción ya descritos. Las partes largas y delgadas deben ser detenidas por un apoyo *estable* situado en la bancada, o por medio de uno *posterior*, con el fin de impedir que la parte se flexione al ser sometida a las fuerzas del corte. Estos apoyos suelen estar equipados con tres vástagos o mordazas ajustables que detienen la pieza de trabajo a la vez que le permiten girar con libertad. Los apoyos fijos están sujetos con abrazaderas directamente sobre los carriles del torno (como se ve en la figura 23.2), mientras que los apoyos posteriores lo están sobre el carro y se mueven con éste.

La herramienta de corte está colocada en el portaherramientas, que es movido por el tornillo sin fin. La herramienta de corte retira material cuando se desplaza a lo largo de la bancada. Una herramienta *derecha* se mueve hacia el cabezal, mientras que una *izquierda* lo hace hacia el contrapunto. Las operaciones de refrentar se realizan desplazando la herramienta radialmente hacia dentro, utilizando la mesa transversal.

Las **herramientas de formado** se utilizan para maquinar diversas formas en piezas de trabajo sólidas y redondas (figura 23.1g), al mover la herramienta en forma radial hacia dentro mientras la pieza de trabajo gira. El corte formador no es apropiado para hacer muescas profundas y estrechas o esquinas agudas debido a la vibración y el traqueteo, lo que ocasiona un mal acabado de la superficie. Como regla: (a) la longitud formada de la parte no debe ser mayor de 2.5 veces el diámetro mínimo de la parte; (b) la velocidad de corte debe fijarse en forma apropiada y (c) deben usarse fluidos de corte. La rigidez de la máquina herramienta y los dispositivos para sujetar el trabajo también constituyen factores importantes a considerar.

La operación de **mandrinado** en un torno es semejante al torneado y se realiza en el interior de piezas de trabajo huecas o en un barreno practicado previamente con un taladro o algún otro medio. Los barrenos redondos fuera de forma también pueden adecuarse con el mandrinado. Esta operación se describe en la sección 23.4.

El **taladrado** (sección 23.5) se ejecuta en un torno montando la broca en el plato de sujeción o en el cuerpo del contrapunto. La pieza de trabajo se sujeta con las mordazas al cabezal y la broca avanza cuando se gira la manivela del contrapunto. Se puede mejorar la posición concéntrica del barreno por medio de un mandrinado posterior. Los barrenos se pueden **rimar** (escariar) (sección 23.6) en el torno de manera parecida al barrenado, lo que mejora la exactitud dimensional y el acabado de la superficie.

Las herramientas de corte para *tronzar*, *hacer ranuras* y *roscar* tienen formas especiales para su propósito particular, o bien existen como insertos. El *moleteado* se efectúa en el torno con ruedas endurecidas (vea la figura 23.11), en las cuales la superficie de las ruedas es una réplica del perfil que se va a generar. Las ruedas se oprimen radialmente contra la pieza de trabajo que gira mientras la herramienta se desplaza en forma axial a lo largo de la parte. Observe que ésta es una operación de formado y no de maquinado, aun cuando se lleve a cabo en un torno.

23.3.4 Tipos de tornos

Tornos de banco. Como el nombre lo dice, están montados sobre una bancada o mesa de trabajo. Tienen baja potencia, por lo general su avance es operado manualmente, y se

utilizan para maquinar piezas de trabajo pequeñas. Son los tornos más sencillos y es común que estén destinados a aficionados o para hacer prototipos de partes pequeñas. Los *tornos de banco de taller* tienen mayor precisión y permiten el maquinado de las partes con mayor exactitud dimensional.

Tornos de propósito especial. Se emplean para aplicaciones como la fabricación de ruedas de ferrocarril, cañones de armas y cilindros de fresas rotatorias, con piezas de trabajo de gran tamaño, como 1.7 m de diámetro por 8 m de longitud (66 pulgadas por 25 pies), y altas capacidades de máquina de hasta 450 kW (600 hp).

Tornos trazadores. Estos tornos tienen aditamentos especiales capaces de tornejar partes con diferentes contornos. También reciben los nombres de *torno duplicador* o *torno de contorno* y en ellos la herramienta sigue una trayectoria que replica el contorno de una plantilla, al igual que un lápiz sigue la forma de un patrón de dibujo. Estas máquinas herramienta han sido sustituidas en gran medida por los *tornos de control numérico* y por los *centros de maquinado*, descritos en la sección 25.2, aunque los aditamentos trazadores aún existen para muchos tornos de motor.

Tornos automáticos. Se han desarrollado varios mecanismos que permiten que las operaciones de maquinado sigan cierta secuencia prescrita. En un *torno totalmente automatizado*, las partes se alimentan y retiran de manera automática; en las máquinas *semiautomáticas*, esas funciones las realiza el operador, aunque el maquinado sí es automático. Los tornos automáticos, ya sea que tengan husillo horizontal o vertical, son apropiados para volúmenes de producción medios o altos.

Los tornos sin contrapunto se llaman *máquinas de plato* o *platos*. Se usan para maquinar piezas individuales de forma regular o irregular y son de tipo de husillo único o múltiple. En otro tipo de torno automático, la barra de la pieza se alimenta en tramos al torno y una vez maquinada una parte, ésta se corta del extremo de la barra.

Máquinas automáticas para barras. También se llaman *máquinas automáticas para tornillos* y están diseñadas para maquinar grandes volúmenes de producción de tornillos y partes similares con rosca. Todas las operaciones se llevan a cabo automáticamente con herramientas situadas en una torreta especial. Después de maquinada cada parte o tornillo hasta sus dimensiones finales, la barra se “empuja” hacia adelante de manera automática a través de la cavidad del husillo y entonces se corta. Las máquinas de barra automática pueden estar equipadas con husillos únicos o múltiples, cuyas capacidades van de 3 a 150 mm (1/8 a 6 pulg) de diámetro de la barra.

Las *máquinas automáticas de husillo único para barras* son similares a los tornos de torreta y están equipadas con varios mecanismos operados por cámaras. En las *automáticas de tipo suizo*, la superficie cilíndrica de la barra sólida que se suministra se maquina utilizando una serie de herramientas que se mueven, radialmente en el mismo plano, hacia la pieza de trabajo. La barra de suministro se sujeta cerca del husillo del cabezal, lo que minimiza las deflexiones debidas al esfuerzo cortante. Estas máquinas herramienta son capaces de hacer un maquinado de gran precisión para partes de diámetro pequeño.

Ahora las máquinas de barra automáticas están equipadas con control numérico computarizado, lo que elimina el uso de cámaras, y la operación se programa para un producto específico (vea la sección 37.3).

Las *máquinas automáticas de husillos múltiples para barras* tienen, por lo general, de cuatro a ocho husillos situados en círculo sobre un tambor grande y cada husillo porta una pieza de trabajo individual. Las herramientas de corte ocupan diferentes posiciones en la máquina y se mueven en dirección tanto axial como radial. Cada parte se maquina por etapas a medida que se desplaza de una estación a la siguiente. Debido a que todas las operaciones se llevan a cabo de manera simultánea, el ciclo de tiempo por parte se reduce.

Tornos de torreta. Estas máquinas herramienta son capaces de realizar múltiples operaciones de corte, como tornejar, mandrinar, taladrar, roscar y refrentar (figura 23.9). En la *torreta hexagonal principal* van montadas varias herramientas de corte, por lo general

hasta seis, y la torreta gira después de que se termina cada operación de corte específica. El torno suele tener una *torreta cuadrada* en la mesa transversal, equipada con hasta cuatro herramientas de corte. La pieza de trabajo, casi siempre una barra larga y redonda, avanza una distancia predeterminada a través del plato de sujeción. Después de maquinada la parte, una herramienta montada en la torreta cuadrada, que se mueve radialmente hacia la pieza de trabajo, corta la barra. Una vez hecho eso, la barra avanza la misma distancia prefijada y se maquina la siguiente parte.

Los tornos de torreta, ya sean el tipo de barra o el de plato, son versátiles, y las operaciones pueden efectuarse a mano, con el torniquete (*timón*) o de manera automática. Una vez preparadas adecuadamente, estas máquinas no requieren operadores muy especializados. También existen *tornos de torre vertical*, más apropiados para piezas de trabajo cortas y pesadas con diámetros de hasta 1.2 m (48 pulg).

El torno de torreta que aparece en la figura 23.10 se conoce como de **tipo paralelo**, en el cual el carro se desliza a lo largo de una base separada sobre la bancada. La corta autonomía del deslizador de la torreta limita esta máquina a las piezas de trabajo relativamente pequeñas y a cortes ligeros en cantidades de producción pequeñas y medias. En otro diseño, llamado de **tipo banco**, la torreta principal está instalada directamente sobre el banco, el cual se desliza a lo largo de la bancada. La longitud del ciclo está limitada sólo por la longitud de la bancada; este tipo de torno está construido en forma más robusta y se usa para maquinar piezas de trabajo grandes. Debido al elevado peso de sus componentes, las operaciones en tornos tipo banco son más lentas que las que se efectúan en los de tipo paralelo.

Tornos controlados por computadora. En la mayoría de tornos avanzados, el movimiento y control de la máquina herramienta y sus componentes son activados por un *control numérico computarizado* (CNC, por sus siglas en inglés). Las características de dichos tornos se muestran en la figura 23.11a. Estos tornos por lo general están equipados con una o más torretas, cada una de las cuales está equipada con varias herramientas y realiza varias operaciones en diferentes superficies de la pieza de trabajo (figura 23.11b). Los diámetros de la pieza de trabajo pueden ser de hasta un metro (36 pulg).

Para aprovechar las ventajas de los nuevos materiales de las herramientas de corte, los tornos controlados por computadora están diseñados para operar más rápido y disponen de más potencia en comparación con otros tornos; están equipados con *cambiadores automáticos de herramienta* (ATC, por sus siglas en inglés). Sus operaciones son confiables por lo repetible, mantienen la exactitud dimensional deseada y requieren una mano de obra menos especializada (una vez preparada la máquina); son adecuados para un volumen de producción de bajo a medio.

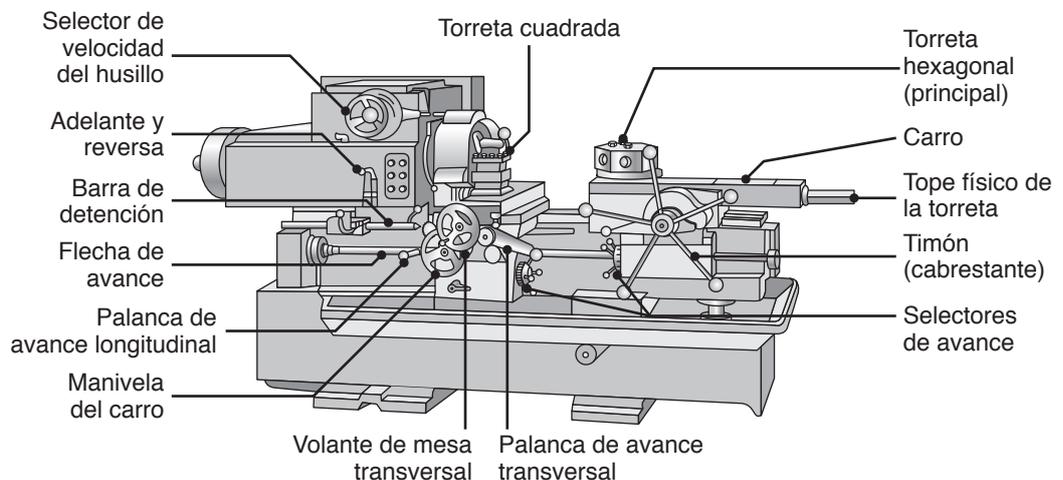


FIGURA 23.10 Ilustración esquemática de los componentes de un torno de torreta; observe las dos torretas: cuadrada y hexagonal (torreta principal).

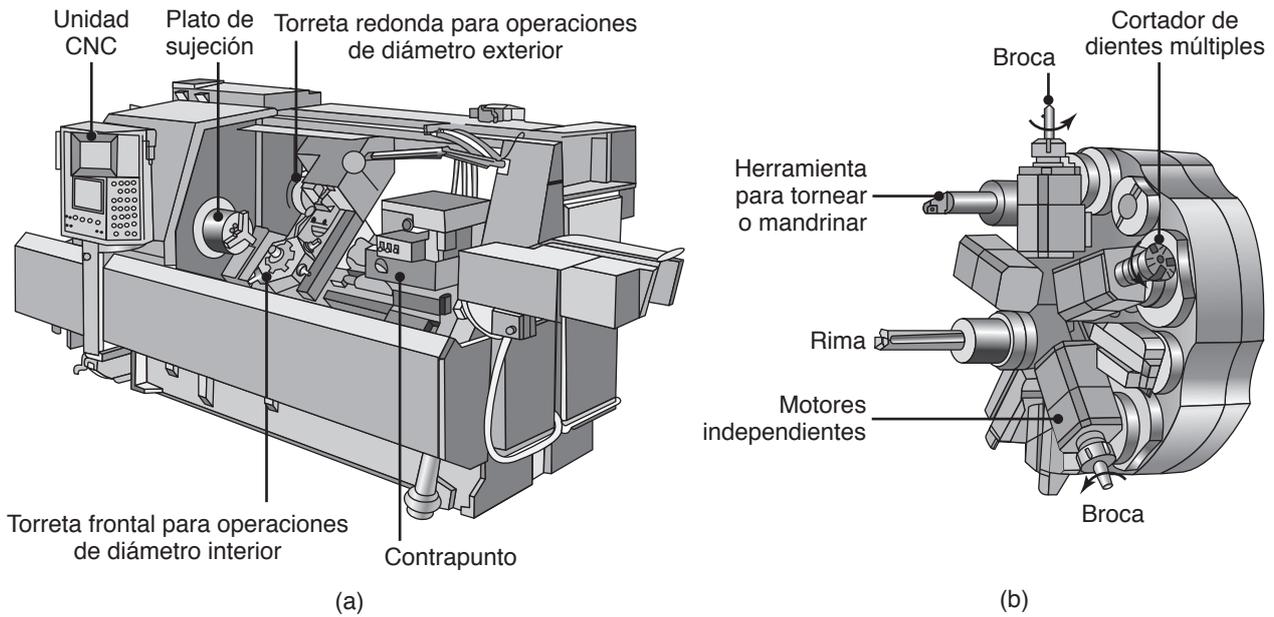


FIGURA 23.11 (a) Torno de control numérico computarizado; observe las dos torretas. Estas máquinas tienen más potencia y velocidad del husillo que otros tornos con el objeto de aprovechar las nuevas herramientas de corte con propiedades mejoradas. (b) Torreta común equipada con 10 herramientas, algunas de las cuales están energizadas.

EJEMPLO 23.2 Partes comunes elaboradas en tornos de CNC

Las capacidades de las máquinas herramientas de control numérico computarizado se ilustran en la figura 23.12, donde se indica el material de la pieza de trabajo, el número de herramientas de corte usadas y los tiempos de maquinado. Estas partes también pueden

elaborarse en tornos manuales o de torreta, aunque no de manera tan eficaz o consistente.

Fuente: Cortesía de Monarch Machine Tool Company.

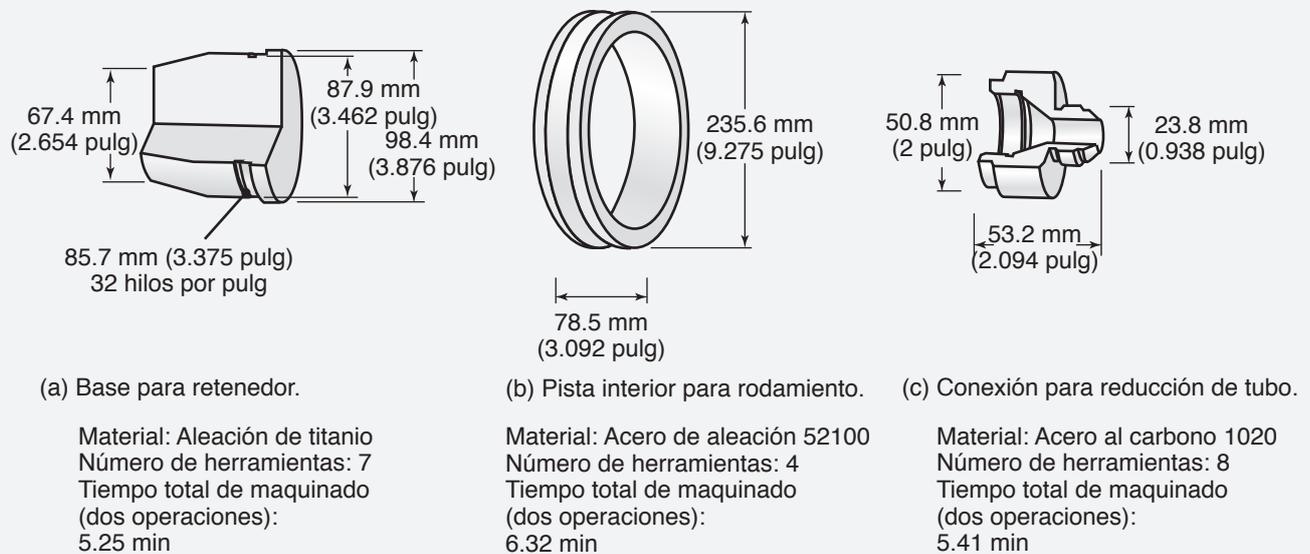


FIGURA 23.12 Partes comunes elaboradas en tornos de CNC.

EJEMPLO 23.3 Maquinado de formas complejas

En el ejemplo 23.2 observe que las partes son simétricas con respecto a un eje. Las capacidades del torneado con CNC se ilustran aún mejor en la figura 23.13, donde se ven tres partes adicionales más complejas: la flecha de una bomba, un cigüeñal y una parte tubular con rosca interna. Más adelante se da la descripción de estas partes; como en la mayoría de las operaciones, el maquinado de estas partes consiste tanto en los cortes de desbaste como en los acabados:

1. *Flecha (eje) de bomba* (figura 23.13a). Esta parte, así como una amplia variedad de piezas similares con características externas e internas, incluyendo árboles de levas, se produjo en un torno de CNC con dos torretas. El torno tiene una construcción similar a la de la máquina herramienta ilustrada en la figura 23.11a. Cada torreta puede contener hasta ocho herramientas. Para producir esta forma particular, la torreta superior se programa de manera que su movimiento radial esté sincronizado con la rotación de la flecha (figura 23.13b).

El ángulo de giro del husillo se monitorea directamente, un procesador ejecuta un cálculo a alta velocidad y después el CNC envía un comando a la torreta en función de ese ángulo. La máquina tiene una retroalimentación de posicionamiento absoluto por medio de un sistema de escalas de gran exactitud. El CNC compara el

valor real con el enviado por el comando, luego realiza una compensación automática con el empleo de una función de aprendizaje predeterminada. La torreta tiene un diseño ligero para efectuar operaciones suaves, lo que también reduce las fuerzas inerciales.

La flecha puede ser fabricada en aluminio o en acero inoxidable. Los parámetros de maquinado para el aluminio se dan en la tabla 23.8 (vea la parte a en la primera columna de la tabla). Compárense dichos parámetros con los datos de la tabla 23.4, la cual proporciona sólo un rango amplio y aproximado como lineamiento. Los insertos fueron un carburo no recubierto K10 (C3) con diamante policristalino compactado (vea la figura 22.10). El maquinado del DE en la tabla se refiere a los dos extremos cilíndricos rectos de la parte. El tiempo total de maquinado para la flecha de aluminio fue de 24 minutos; para acero inoxidable fue de 55 min, ya que la velocidad de corte para este material es considerablemente menor que para el aluminio.

2. *Cigüeñal* (figura 23.13c). Esta parte está elaborada en hierro fundido dúctil (nodular) y los parámetros de maquinado se muestran en la parte b de la tabla 23.7. El inserto fue un carburo K10. El tiempo de maquinado fue de 25 min, que es

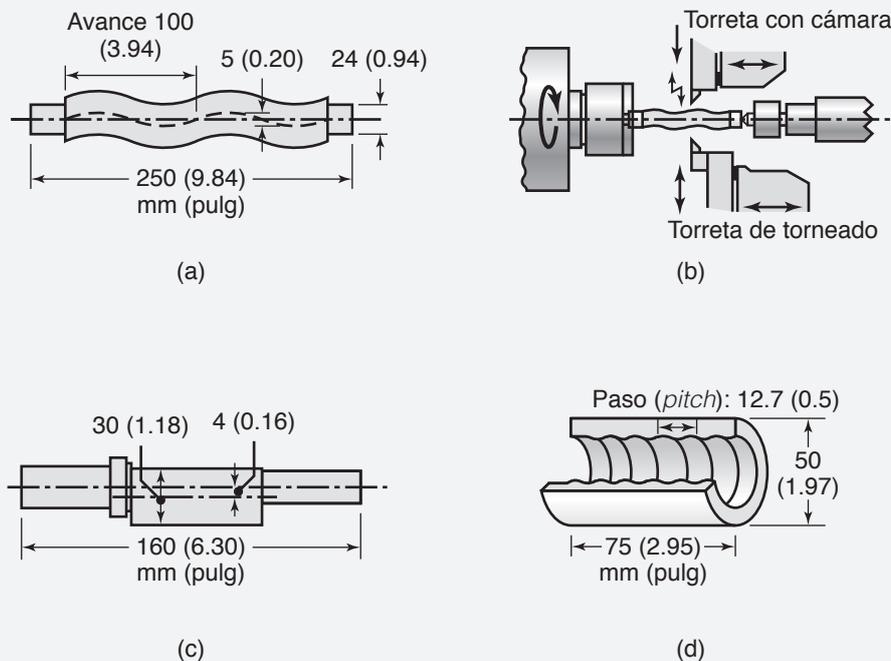


FIGURA 23.13 Ejemplos de cuatro partes con formas más complejas que pueden producirse en un torno de CNC.

TABLA 23.8

Resumen de maquinado para el ejemplo 23.3

Operación	Velocidad (rpm)	Velocidad de corte	Profundidad de corte	Avance	Herramienta de corte
Partes a y b:					
Diámetro exterior (DE)					
Desbaste	1150	160 m/min (525 pies/min)	3 mm (0.12 pulg)	0.3 mm/rev (0.012 pulg/rev)	K10 (C3)
Acabado	1750	250 (820)	0.2 (0.008)	0.15 (0.006)	K10 (C3)
Guía					
Desbaste	300	45 (148)	3 (0.12)	0.15 (0.006)	K10 (C3)
Acabado	300	45 (148)	0.1 (0.004)	0.15 (0.006)	Diamante compacto
Parte c: Flecha excéntrica					
Desbaste	200	5-11 (16-136)	1.5 (0.059)	0.2 (0.008)	K10 (C3)
Acabado	200	5-11 (16-136)	0.1 (0.004)	0.05 (0.0020)	K10 (C3)
Parte d: Rosca interna					
Desbaste	800	70 (230)	1.6 (0.063)	0.15 (0.006)	Carburo recubierto
Acabado	800	70 (230)	0.1 (0.004)	0.15 (0.006)	Cermet

del mismo orden de magnitud que el de la flecha de bomba descrito antes.

3. *Parte tubular con rosca interna* (figura 23.13d). Esta parte, hecha con acero inoxidable 304, se maquinó en las condiciones dadas por la parte d de la tabla 23.8. El material original fue una pieza tubular recta, semejante a un cojinete. Las herramientas de corte fueron carburo recubierto y cermet. La barra mandrinadora era de carburo de tungsteno, para obtener mayor rigidez y con ello mejores exactitud dimensional y acabado de la superficie. Para la parte roscada, la exactitud dimensional fue de ± 0.05 mm (0.002 pulg), con un acabado superficial de $R_a = 2.5$ μ m (100 μ pulg).

El tiempo de maquinado para esta parte fue de 1.5 min, el cual es mucho más corto que los correspondientes a las dos partes descritas previamente. La razón es que (a) esta parte es más corta; (b) se removió menos material; (c) no tiene los rasgos de excentricidad de las dos primeras piezas, por lo que el movimiento radial de la herramienta de corte no es una función de la posición angular de la parte, y (d) la velocidad de corte es mayor.

Fuente: Basado en bibliografía técnica suministrada por Okuma Corp.

23.3.5 Capacidades del proceso de torneado

Las *tasas de producción* relativas en el torneado, así como en otras operaciones de maquinado descritas en el resto de este capítulo y en el 24, se presentan en la tabla 23.9. Dichas tasas juegan un papel importante en la productividad de las operaciones de maquinado. Observe que hay grandes diferencias en la tasa de producción entre los procesos que aparecen en la tabla. Estas diferencias se deben no sólo a las características inherentes de los procesos y las máquinas herramienta, sino también a otros diversos factores, como los tiempos de preparación y los tipos y tamaños de las piezas de trabajo a maquinar.

Las especificaciones dadas en la tabla 23.9 son relativas y puede haber variaciones importantes en aplicaciones especiales. Por ejemplo, los rodillos térmicamente tratados, de acero inoxidable al alto carbono para molinos rodantes, se pueden maquinar en tornos especiales con herramientas cermet y con tasas de remoción de material tan grandes como 6000 cm³/min (370 pulg³/min). También llamado **maquinado de alta tasa de remoción**, este proceso tiene al menos dos requerimientos importantes: (a) una rigidez muy alta de la

TABLA 23.9**Tasas de producción comunes para varias operaciones de maquinado**

Operación	Velocidad
Torneado	
Torno de motor	Muy baja a baja
Torno trazador	Baja a media
Torno de torreta	Baja a media
Torno controlado por computadora	Baja a media
Plato de sujeción de un solo husillo	Media a alta
Plato de sujeción de husillos múltiples	Alta a muy alta
Mandrinado	Muy baja
Taladrado	Baja a media
Fresado	Baja a media
Cepillado	Muy baja
Corte de engrane	Baja a media
Brochado	Media a alta
Aserrado	Muy baja a baja

Nota: Las tasas de producción indicadas son relativas. *Muy baja* es alrededor de una o más partes por hora, *media* es aproximadamente 100 partes por hora y *muy alta* es 1000 o más partes por hora.

máquina herramienta, con el fin de evitar el traqueteo y la rotura asociada de la herramienta, y (b) mucha potencia, de hasta 450 kW (600 hp).

El acabado de la superficie (figura 23.14) y la exactitud dimensional (figura 23.15) obtenidos en el torneado y operaciones relacionadas dependen de varios factores, por ejemplo las características y condición de la máquina herramienta, rigidez, vibración y traqueteo, parámetros del proceso, geometría y desgaste de la herramienta, uso de fluidos de corte, maquinabilidad del material de la pieza de trabajo y habilidad del operador. Como resultado, puede obtenerse un rango amplio de acabados de la superficie, como se ilustra en la figura 27.4.

23.3.6 Consideraciones de diseño y lineamientos para las operaciones de torneado

En el diseño de partes por maquinarse de manera económica con operaciones de torneado, son importantes varias consideraciones. Debido a que el maquinado en general (a) requiere tiempo considerable, lo que incrementa el costo de producción, (b) desperdicia material y (c) no es tan económico como las operaciones de moldeo o formado, debe evitarse tanto como sea posible. Cuando son necesarias las operaciones de torneado, deben tomarse en cuenta los siguientes lineamientos generales de diseño:

1. Las partes deben diseñarse de modo que puedan acomodarse y sujetarse con facilidad en los dispositivos de sujeción del trabajo. Las piezas de trabajo delgadas y finas son difíciles de sostener adecuadamente y deben ser capaces de soportar las fuerzas de las mordazas y del corte (vea también *montajes flexibles*, sección 37.8).
2. La exactitud dimensional y el acabado superficial especificados deben ser tan holgados como sea permisible, pero asegurándose de que la parte funcione adecuadamente.
3. Debe evitarse en lo posible que la pieza contenga esquinas agudas, ahusamientos, escalones e importantes variaciones dimensionales.
4. Los materiales en bruto a ser maquinados deben estar lo más cerca posible de sus dimensiones finales (como tener una forma casi neta) para reducir el ciclo del tiempo de producción.
5. Las partes deben diseñarse de modo que las herramientas de corte puedan desplazarse a través de la pieza de trabajo sin ninguna obstrucción.
6. Las características de diseño deben ser tales que sea posible usar herramientas de corte, insertos y portaherramientas comercialmente disponibles.
7. Los materiales de la pieza de trabajo deben seleccionarse de preferencia por su maquinabilidad (sección 21.7).

Lineamientos para las operaciones de torneado. La siguiente lista menciona los lineamientos generalmente aceptados para las operaciones de torneado; vea también en la tabla 23.10 las probables causas de problemas en el torneado.

1. Minimizar los salientes de la herramienta.
2. Sostener con rigidez la pieza de trabajo.
3. Usar máquinas herramienta de mucha rigidez y alta capacidad de amortiguamiento.
4. Cuando las herramientas comiencen a vibrar y a traquetear (sección 25.4), modifique uno o más de los parámetros del proceso, por ejemplo la geometría de la herramienta, velocidad de corte, velocidad de avance, profundidad de corte y fluido de corte (vea también control adaptativo, sección 37.4).

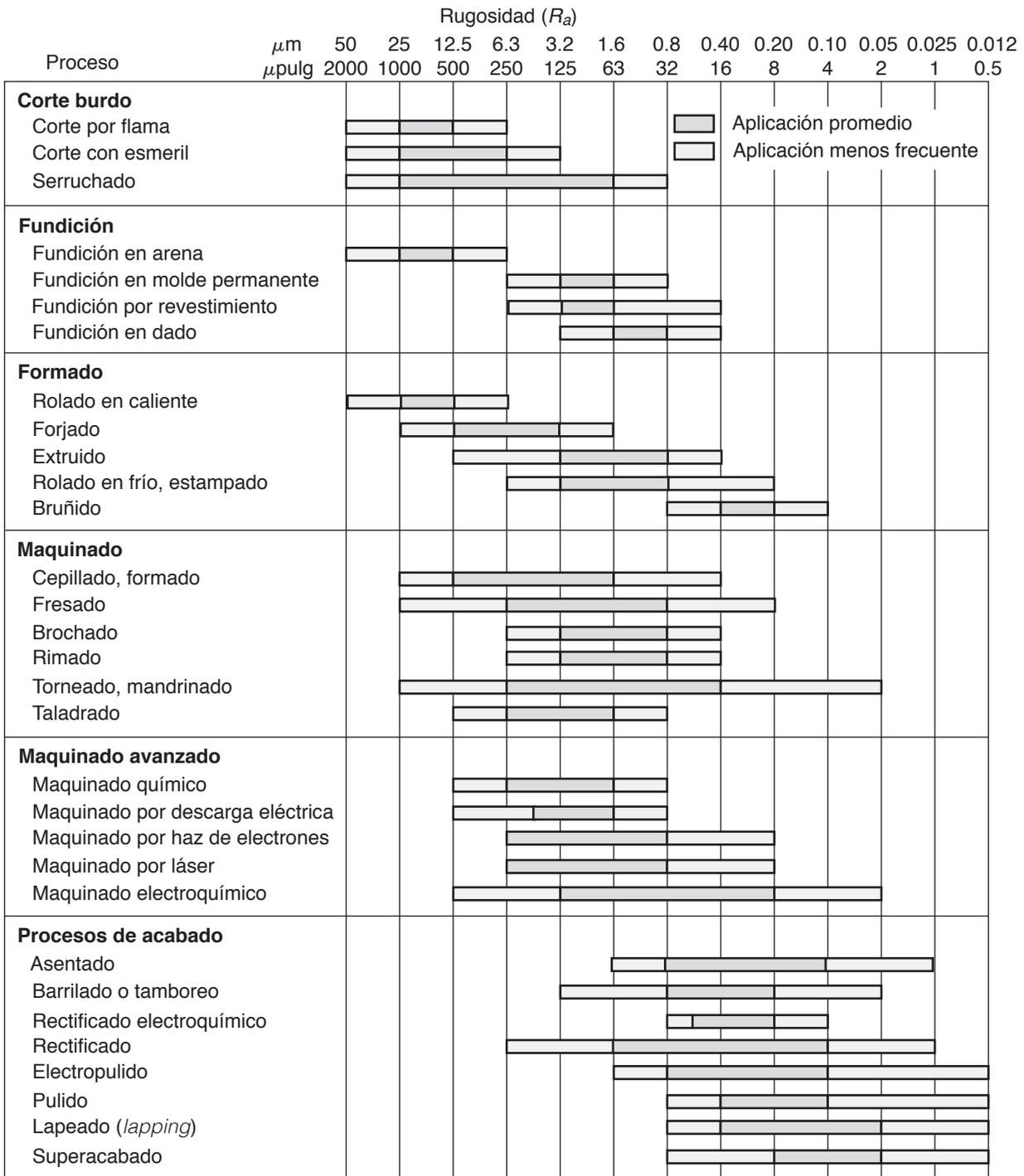


FIGURA 23.14 Rango de rugosidad de la superficie obtenida en varios procesos; observe el amplio rango dentro de cada grupo, en especial en el torneado y mandrinado.

23.3.7 Sistemas de recolección de viruta

Las virutas producidas durante el maquinado se deben recoger y eliminar adecuadamente. El volumen generado de viruta puede ser muy grande, en especial en el maquinado de ultra alta velocidad y en las operaciones de alta tasa de remoción de material. Por

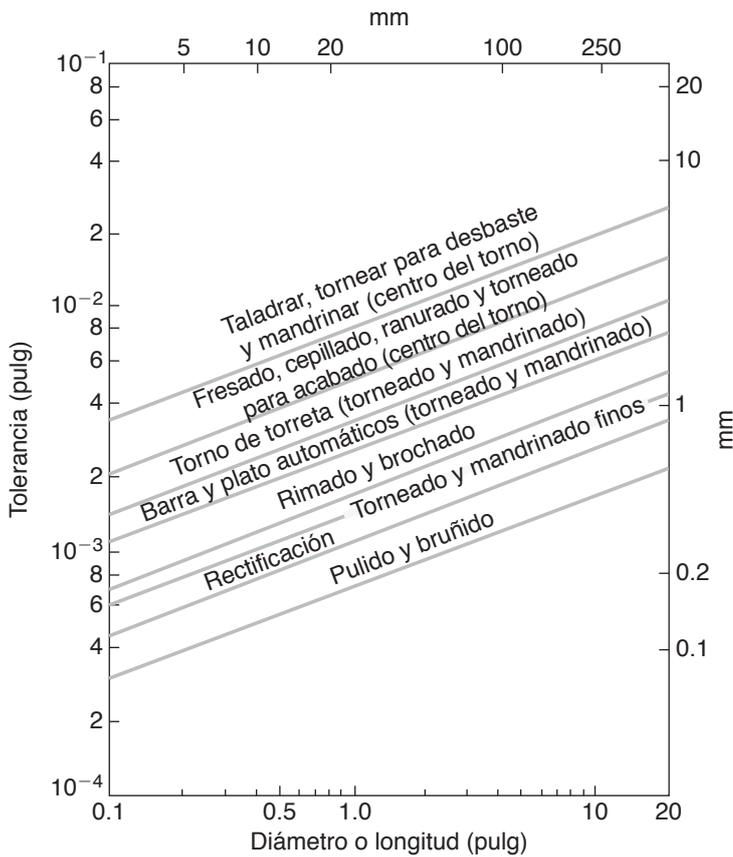


FIGURA 23.15 Rango de las tolerancias dimensionales obtenidas en diferentes procesos de maquinado como una función del tamaño de la pieza de trabajo; observe que hay una diferencia de un orden de magnitud entre las piezas pequeñas y las grandes.

ejemplo, en una operación de taladrado en acero durante la cual sólo se retira 1 pulg³ de metal, el volumen bruto holgado de las virutas, en función de su tipo (vea la sección 21.2.1), puede estar en el rango de 40 a 800 pulg³. Del mismo modo, el fresado de 1 pulg³ de acero produce de 30 a 45 pulg³ de virutas, en tanto que el hierro fundido produce de 7 a 15 pulg³ de virutas.

También llamado **administración de la viruta**, el sistema implica recolectar las virutas desde su origen en la máquina herramienta de una manera eficiente y retirarlas del área de trabajo. Las virutas largas y encadenadas son más difíciles de recolectar que las cortas, las cuales se producen al emplear herramientas con características que quiebran la viruta (vea las figuras 21.7 y 22.2). Así, el tipo de viruta producida debe ser un aspecto integral del sistema de recolección.

Las virutas pueden recogerse con alguno de los métodos siguientes:

- Dejar que la gravedad las lleve a una banda de acero transportadora.
- Recolectar de un tanque de asentamiento.
- Uso de barrenas con tornillos de avance, parecidos a los de molinos de carne.
- Uso de bandas magnéticas, sólo para virutas ferrosas.
- Empleo de métodos de vacío de remoción de viruta.

Las máquinas herramienta modernas están diseñadas con dispositivos automáticos de manejo de viruta. Puede haber una cantidad considerable de fluido de corte mezclado con las virutas producidas o recubriéndolas, por lo que es importante la filtración apropiada o su drenaje. El fluido de corte y el agua residual pueden separarse con el empleo de exprimidores de viruta (centrífugos). Los sistemas de procesamiento de viruta, por lo general, requieren un espacio de piso considerable en la planta y llegan a costar desde \$60 000, para talleres pequeños, hasta más de \$1 millón para plantas grandes.

TABLA 23.10

Guía general de problemas en las operaciones de torneado

Problema	Causas probables
Rotura de la herramienta	El material de la herramienta carece de resistencia, ángulos inadecuados de la herramienta, falta de rigidez en la máquina herramienta, rodamientos y componentes de la máquina desgastados, parámetros de maquinado demasiado altos.
Desgaste excesivo de la herramienta	Parámetros de maquinado demasiado altos, material inadecuado de la herramienta, fluido de corte ineficaz, ángulos de la herramienta inadecuados.
Acabado rugoso de la superficie	Generación de borde en la herramienta; avance demasiado alto; herramienta muy afilada, astillada o usada; vibración y traqueteo.
Variabilidad dimensional	Falta de rigidez de la máquina herramienta y los dispositivos de sujeción de la pieza de trabajo, aumento excesivo de la temperatura, desgaste de la herramienta.
Traqueteo de la herramienta	Falta de rigidez de la máquina herramienta y los equipos que sujetan la pieza de trabajo, uso excesivo de la herramienta, los parámetros del maquinado no se establecieron en forma apropiada.

Las virutas recolectadas se pueden reciclar si se decide que es económico hacerlo. Antes de su retiro de la planta manufacturera, puede reducirse el gran volumen de las virutas hasta una quinta parte del volumen suelto por *compactación* (compresión) en tabiques o *trituration*. Las virutas secas son más valiosas para el reciclado, ya que reducen la contaminación ambiental. El método elegido para retirar las virutas depende de la economía, así como del cumplimiento de las regulaciones locales, estatales y federales. Hoy en día, la tendencia es a reciclar todas las virutas, así como los fluidos de corte usados y el agua residual.

23.3.8 Corte de roscas

Una *rosca de tornillo* puede definirse como una protuberancia de sección transversal uniforme que sigue una trayectoria helicoidal o espiral en el exterior o interior de una superficie cilíndrica (*rosca recta*) o con un ahusamiento (*rosca cónica*). Los destornilladores mecánicos, armellas y tuercas tienen roscas rectas, al igual que los rodillos roscados para aplicaciones como el tornillo sin fin de los tornos y diversos componentes de máquinas (figura 23.2). Es común que las roscas cónicas se utilicen para tubos de agua o gas, así como suministros de plomería, los cuales requieren una conexión cónica para el agua o el aire. Las roscas pueden ser de *mano derecha* o de *mano izquierda*.

Por tradición, las roscas se han maquinado, pero cada vez más son formadas, por **laminación de roscas** (descrita en la sección 13.5). Las roscas laminadas ahora constituyen la cantidad más grande de partes con rosca exterior que se producen. También es posible fundir partes roscadas, pero hay limitantes por la exactitud dimensional, el acabado de la superficie y las dimensiones mínimas.

Las roscas pueden maquinarse, ya sea externa o internamente, con una herramienta cortadora en un proceso llamado *corte de rosca*, o *roscado*. Las roscas externas también pueden ser cortadas con un *troquel* o por fresado. Es común que las roscas internas se produzcan por machuelado con el uso de una herramienta roscada especial llamada *machuelo* (sección 23.7). Posteriormente, las roscas se pueden procesar para obtener una mayor exactitud dimensional y buen acabado superficial para aplicaciones como destornilladores en máquinas.

Corte de una rosca de tornillo en un torno. En la figura 23.16a se muestra una operación común de corte de rosca en un torno. La herramienta de corte, la forma de la que depende el tipo de rosca por cortar, se monta en un portaherramientas y se desplaza a lo largo de la longitud de la pieza de trabajo por medio del tornillo sin fin del torno. Este movimiento se logra por el engranado de la *tuerca bipartida*, también llamada *media tuerca*, dentro del tablero del torno (vea la figura 23.2).

El movimiento axial de la herramienta, en relación con la rotación de la pieza de trabajo, determina la dirección de la rosca del tornillo (es decir, la distancia axial desplazada en una revolución completa del tornillo). Para una velocidad fija del husillo, cuanto más lento sea el movimiento de la herramienta, más fina será la rosca. En el corte de la rosca, la herramienta cortadora puede avanzar radialmente hacia la pieza de trabajo, por lo que cortará ambos lados de la rosca al mismo tiempo, como en el corte de formas descrito antes; sin embargo, este método suele producir un mal acabado de la superficie.

Por lo general se requiere cierto número de pasos, en la secuencia que se ilustra en la figura 23.16b, para producir roscas con buena exactitud dimensional y acabado superficial correcto. La figura 23.16c presenta un inserto de carburo para cortar roscas de tornillo (*inserto roscador*) para maquinar roscas en un eje cilíndrico. La figura 23.16d muestra un proceso de corte de rosca de tornillo interna. Excepto para las corridas pequeñas de producción, el proceso de cortar una rosca ha sido reemplazado en gran parte por otros métodos, como el laminado de roscas, el maquinado automático de tornillos y el uso de tornos de control numérico computarizado.

La tasa de producción al cortar roscas de tornillo puede incrementarse con herramientas llamadas *peines* (figuras 23.17a y b), que generalmente tienen cuatro cortadores con dientes múltiples y se ajustan radialmente. Después de cortadas las roscas, los cortadores se abren en forma automática (de ahí el nombre alternativo de *peines de autoapertura*)

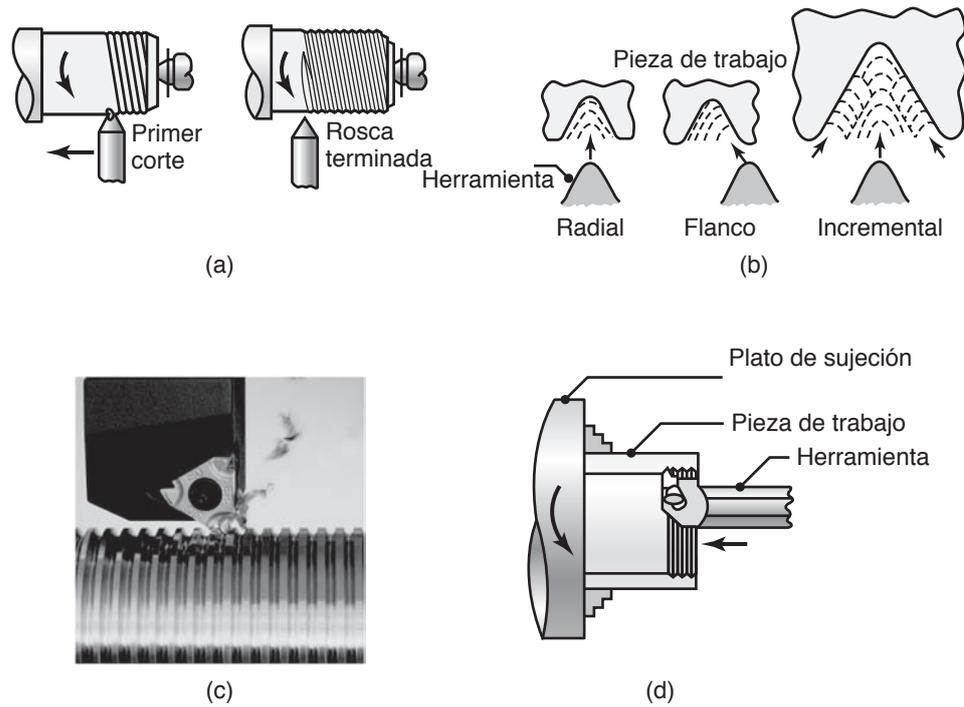


FIGURA 23.16 (a) Corte de roscas de tornillo en un torno con una herramienta de corte de un solo punto. (b) Corte de roscas de tornillo con una herramienta de un solo punto en varias pasadas, que normalmente se utiliza para roscas grandes. Las flechas pequeñas en las figuras muestran la dirección del avance y las líneas punteadas indican la posición de la herramienta cortadora conforme pasa el tiempo. En el corte radial, la herramienta avanza directamente hacia la pieza de trabajo. En el corte del flanco, la herramienta avanza hacia la pieza a lo largo de la cara derecha de la rosca. En el corte incremental, la herramienta primero avanza directamente hacia la pieza en el centro de la rosca, después hacia sus lados y por último hacia la raíz. (c) Inserto de carburo revestido, en el proceso de corte de roscas de tornillo en un eje cilíndrico. (d) Corte de roscas de tornillo internas con un inserto de carburo. Fuente: (c) Cortesía de Iscar Metals, Inc.

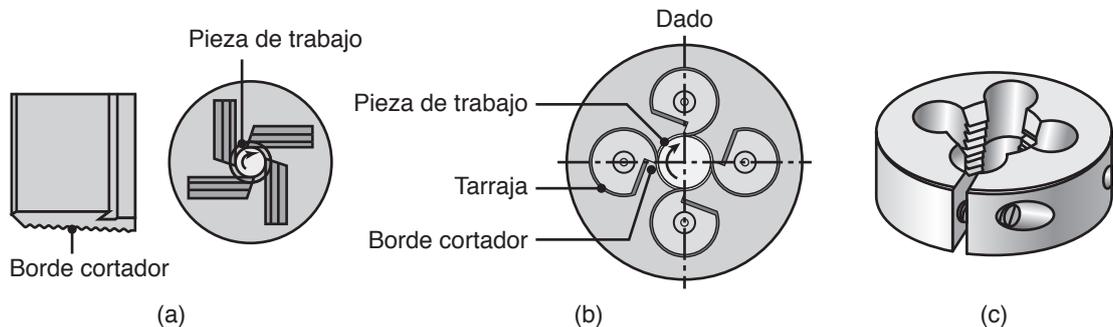


FIGURA 23.17 (a) Peine recto para corte de roscas en un torno. (b) Peine circular. (c) Tarraja.

al rotar alrededor de sus ejes para permitir el retiro de la parte. Las *tarrajas* también se hallan disponibles para cortar o manufacturar roscas de tornillo rectas.

Consideraciones de diseño para maquinado de roscas de tornillo. Las consideraciones de diseño que deben tomarse en cuenta con el fin de producir roscas de tornillo económicas y de alta calidad son las siguientes:

- Los diseños deben permitir la terminación de roscas antes de que alcancen el hombro del perno. Las roscas internas en barrenos ciegos deben tener una longitud no roscada en el fondo (el término *barreno ciego* se refiere a un orificio que no pasa a través de todo el espesor de la pieza de trabajo; vea, por ejemplo, la figura 23.1i).
- Es recomendable esforzarse en eliminar barrenos poco profundos, ciegos o con ahusamientos.
- Se deben especificar los chaflanes en los extremos de las secciones roscadas para minimizar las roscas con aletas o con rebabas.
- Las secciones roscadas no deben estar interrumpidas con ranuras, perforaciones ni otras discontinuidades.
- En la medida de lo posible, se deben usar herramientas e insertos estándar de roscado.
- Las partes de paredes delgadas deben tener espesor y resistencia suficientes para resistir el empleo de mordazas y las fuerzas de corte. Una regla práctica común es que la longitud mínima de contacto de un sujetador debe ser de 1.5 veces el diámetro de la pieza.
- Las partes deben diseñarse de modo que todas las operaciones de corte se terminen en una pasada.

23.4 Mandrinado y máquinas para mandrinar

El *mandrinado* agranda un barreno hecho previamente con otro proceso o produce perfiles circulares internos en piezas de trabajo huecas (figura 23.1h). Las herramientas de corte son similares a las que se usan en el torneado y se montan en una *barra de mandrinar* (figura 23.18a) con el fin de alcanzar la longitud completa del mandrinado. Es esencial que la barra de mandrinar sea lo suficientemente rígida como para minimizar la deflexión y vibración de la herramienta, y que así se mantenga la exactitud dimensional y el acabado de la superficie. Por esta razón, es deseable un material con módulo de elasticidad elevado, como carburo de tungsteno. Las barras de mandrinar también han sido diseñadas y construidas con la capacidad de absorber la vibración (figura 23.18b).

Las operaciones de mandrinado en piezas de trabajo relativamente pequeñas pueden llevarse a cabo en tornos, mientras que las grandes se maquinan en **mandrinadoras**. Estas máquinas herramienta son horizontales o verticales y son capaces de efectuar diversas operaciones, como torneado, refrentado, ranuras y chaflanes. En las **mandrinadoras horizontales** la pieza de trabajo se monta en una mesa que puede desplazarse horizontalmente, tanto en la dirección axial como en la radial. La herramienta cortadora se monta en un husillo que gira en el cabezal y es capaz de efectuar movimientos verticales y longitudinales. También pueden montarse en el husillo de la máquina brocas, rimas, machuelos y fresas. Una **mandrinadora vertical** (figura 23.19) es similar a un torno, tiene un eje vertical de rotación de la pieza de trabajo y puede albergar piezas con diámetros tan grandes como 2.5 m (98 pulg.).

La herramienta de corte suele ser de un solo punto, hecha en acero de alta velocidad M2 o M3, de carburo P10 (C7) o P01 (C8). Se monta en el portaherramientas, el cual

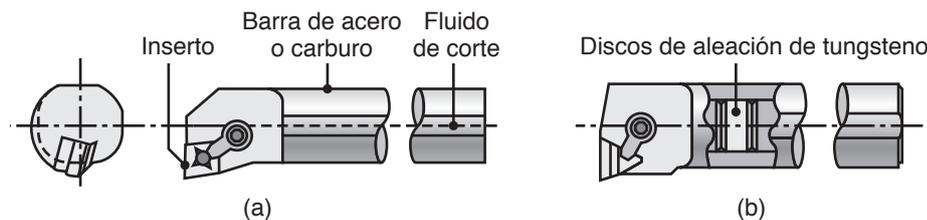


FIGURA 23.18 (a) Ilustración esquemática de una barra de mandrinado de acero con inserto de carburo; observe el pasaje en la barra para la aplicación de fluido de corte. (b) Ilustración esquemática de una barra de mandrinado con “discos de inercia” de aleación de tungsteno sellados en la barra para contrarrestar la vibración y el traqueteo durante el mandrinado; este sistema es eficaz para mandrinar razones longitud a diámetro de la barra de hasta seis.

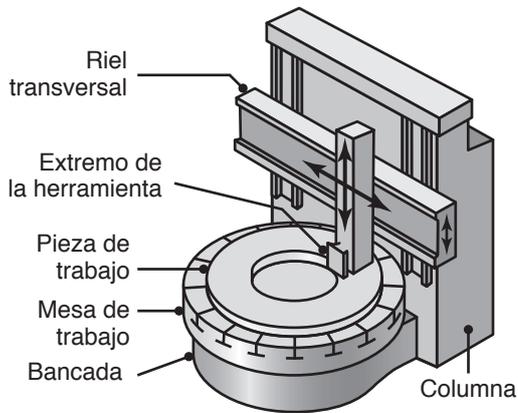


FIGURA 23.19 Ilustración esquemática de una mandrinadora vertical; esta máquina puede recibir piezas de trabajo con tamaños de hasta 2.5 m (98 pulg) de diámetro.

tiene la capacidad de hacer movimientos vertical (para mandrinar y torneado) y radial (para refrentar) guiado por el riel transversal; la cabeza puede girar para producir barrenos cónicos (con ahusamiento). Las velocidades de corte y avance para el mandrinado son semejantes a las del torneado (vea la tabla 23.9).

Las máquinas de mandrinar están disponibles con diversas características. Sus capacidades varían hasta 150 kW (200 hp), también las hay con controles numéricos computarizados, lo que permite que se programen todos los movimientos de la máquina. Se requiere poca participación del operador, con lo que se mejoran la consistencia y la productividad.

Consideraciones de diseño para el mandrinado. Los lineamientos para las operaciones económicas de mandrinado son semejantes a los del torneado; adicionalmente, deben considerarse los siguientes factores:

- Siempre que sea posible deben especificarse barrenos completos en lugar de ciegos. El término *barreno ciego* se refiere a aquel que no traspasa todo el espesor de la pieza de trabajo.
- Cuanto más grande sea la razón longitud a diámetro de mandrinado, más difícil es mantener las dimensiones debido a la deflexión de la barra de mandrinado por las fuerzas de corte, así como por la mayor tendencia a la vibración y al traqueteo.
- Deben evitarse las superficies internas interrumpidas, como empalmes o perforaciones radiales que atraviesen todo el espesor de la parte.

23.5 Taladrado, brocas y taladros

Cuando se inspeccionen productos grandes o pequeños, se notará que la gran mayoría tiene perforaciones. La **perforación de barrenos** está entre las operaciones más importantes de la manufactura, y el **taladrado** es un proceso importante y común en dicha tarea; otros procesos para producir perforaciones son el punzonado (como se describió en la sección 16.2) y distintos procesos de maquinado (capítulo 27). El costo de hacer perforaciones está entre los más elevados del maquinado en la producción de motores de automóvil.

23.5.1 Brocas

Las *brocas* por lo común tienen razones elevadas de longitud a diámetro (figura 23.20), de ahí su capacidad de producir barrenos relativamente profundos. Sin embargo, las razones elevadas hacen que las brocas sean algo flexibles y proclives a fracturarse o producir barrenos inexactos; además, las virutas producidas en el interior de la perforación plantean dificultades significativas para su eliminación y para la eficacia del fluido de corte.

Las brocas suelen dejar *rebabas* en la superficie inferior de la parte perforada y con frecuencia se necesitan operaciones de rebabeo (sección 26.8). Asimismo, debido a su movimiento rotatorio, el taladrado produce barrenos con paredes que tienen marcas de *circunferencia*; en contraste, las perforaciones hechas con punzonado tienen marcas *longitudinales* (vea la figura 16.5a). Esta diferencia es significativa en términos de las propiedades de fatiga de la perforación, como se describe en la sección 33.2.

El diámetro de un barreno producido por taladrado es ligeramente mayor que el de la broca (*exceso de tamaño*), como puede notarse al observar que una broca se retira con facilidad de la perforación que acaba de producir. La cantidad excedente de tamaño depende de la calidad de la broca, el equipo y las prácticas de maquinado que se hayan utilizado. Además, según sus propiedades térmicas, algunos metales y materiales no

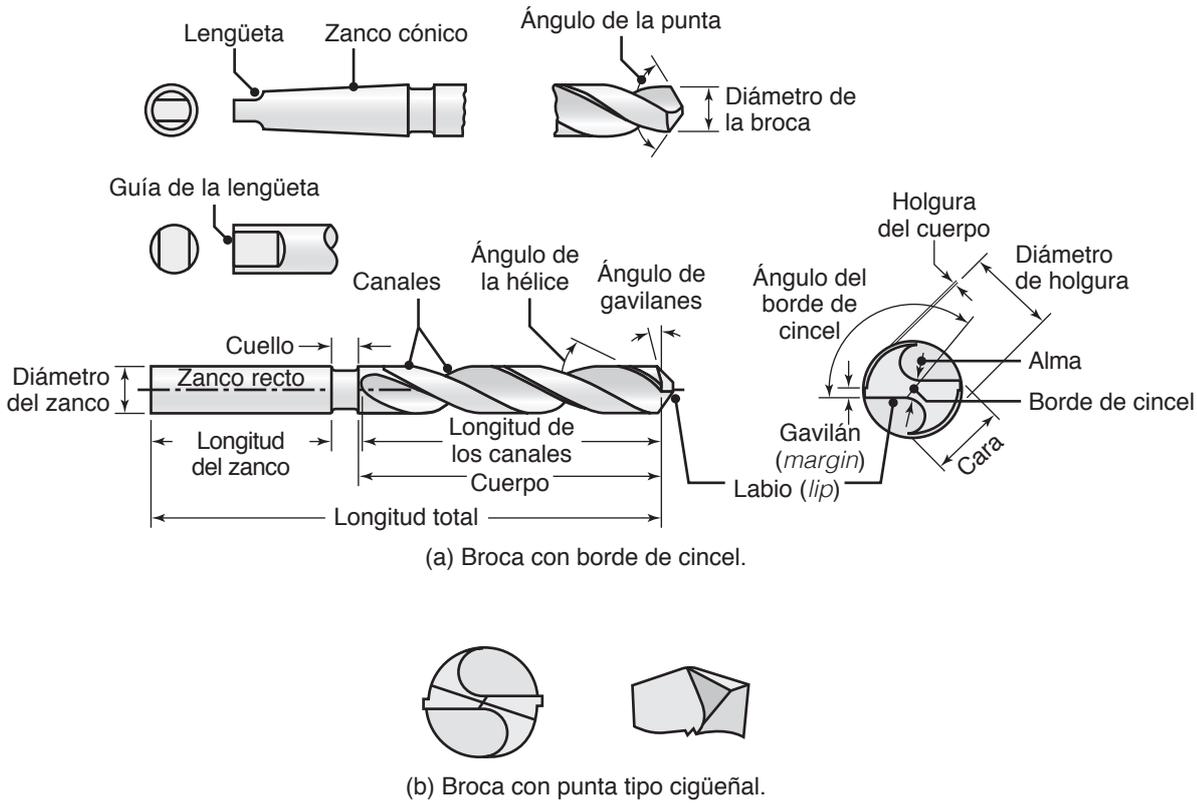


FIGURA 23.20 Dos tipos comunes de brocas: (a) broca con borde de cincel; la función del par de márgenes es proporcionar una superficie de deslizamiento de la broca contra las paredes del barreno a medida que penetra en la pieza de trabajo. Se dispone de brocas con cuatro márgenes (*double margin*) para mejorar la guía y exactitud. También existen brocas con elementos para romper las virutas. (b) Broca con punta tipo cigüeñal; estas brocas tienen buena capacidad de centrado y debido a que las virutas tienden a romperse con facilidad, las brocas son apropiadas para producir barrenos profundos.

metálicos se expanden significativamente debido al calor que se produce durante el taladrado, por lo que el diámetro final del barreno podría ser menor que el diámetro de la broca cuando se enfría la parte. Para obtener un mejor acabado de la superficie y exactitud dimensional, los barrenos taladrados pueden someterse a operaciones subsiguientes como el rimado y pulido con abrasivos. En la tabla 23.11 aparecen las capacidades de las operaciones de taladrado y mandrinado.

Broca de giro. La broca más común es la convencional *broca de giro de punto estándar* (figura 23.20a). La geometría del punto de la broca es tal que el ángulo de ataque normal y la velocidad del borde cortante varían con la distancia desde el centro de la broca. Las características principales de esta broca son (con los rangos comunes de ángulos entre paréntesis): (a) *ángulo de la punta* (118 a 135°); (b) *ángulo de gavilanes* (7 a 15°); (c) *ángulo del borde de cincel* (125 a 135°) y (d) *ángulo de la hélice* (15 a 30°).

Dos ranuras espirales, llamadas *canales*, recorren la longitud de la broca y las virutas generadas son enviadas hacia arriba a través de ellas. Las ranuras también sirven como pasajes que permiten que el fluido de corte alcance los bordes cortantes. Algunas brocas tienen perforaciones internas longitudinales (vea por ejemplo la broca en la figura 23.23a)

TABLA 23.11

Herramienta de corte	Rango del diámetro (mm)	Capacidades generales de las operaciones de taladrado y mandrinado	
		Profundidad del barreno/diámetro	
		Común	Máximo
Broca de giro	0.5-150	8	50
Broca de pala	25-150	30	100
Broca de barril	2-50	100	300
Broca de trepanación	40-250	10	100
Barra de mandrinado	3-1200	5	8

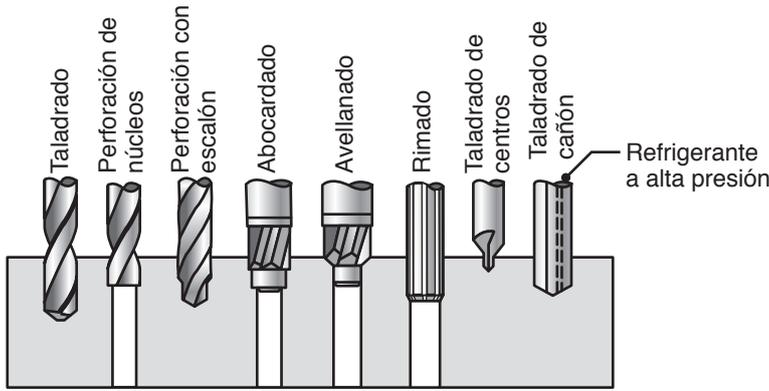


FIGURA 23.21 Distintos tipos de brocas y operaciones de rimado.

a través de las cuales se fuerzan los fluidos de corte, con lo que mejoran la lubricación y el enfriamiento, así como la expulsión de las virutas. Las brocas están disponibles con características **rompevirutas** fijadas a lo largo de los bordes cortantes. Esta característica es importante en el taladrado con maquinaria automatizada, donde es esencial el retiro continuo de largas virutas sin la participación de un operador.

Los distintos ángulos en una broca se han desarrollado a través de la experiencia de muchos años y están diseñados para producir barrenos exactos, minimizar las fuerzas de taladrado y su torque y optimizar la vida de la broca. Los pequeños cambios en la geometría

de la broca pueden tener un efecto significativo en el rendimiento de una broca en particular, por ejemplo, un ángulo de gavilanes demasiado pequeño (figura 23.20a) aumenta la fuerza cortante, lo que genera calor excesivo e incrementa el desgaste de la broca. Por el contrario, un ángulo demasiado grande, puede ocasionar la generación de virutas o la rotura del borde cortante.

Además de las brocas de punto convencional, se han desarrollado varias geometrías de las brocas de punto con el fin de mejorar su rendimiento e incrementar la tasa de penetración. Para producir dichas geometrías se usan técnicas y equipo especiales de rectificado.

Otros tipos de brocas. En la figura 23.21 se muestran varios tipos de brocas. Una broca en escalón produce barrenos con dos o más diámetros diferentes. Una *broca de núcleo* se usa para hacer más grande un barreno ya existente. Las *brocas de abocardado* y de *avellanado* producen depresiones en la superficie para dar acomodo a las cabezas de los tornillos y remaches debajo de la superficie de la pieza de trabajo. Una *broca de centro* es corta y se emplea para producir un barreno en el extremo de una pieza de material, por lo que puede montarse entre los centros del cabezal y el contrapunto de un torno (figura 23.2). Una *broca piloto* se utiliza para preparar (lo que significa comenzar) un barreno en la ubicación deseada de la superficie.

Las *brocas de pala* (figura 23.22a) tienen extremos removibles y se usan para producir barrenos de gran diámetro y profundidad. Estas brocas tienen las ventajas de una

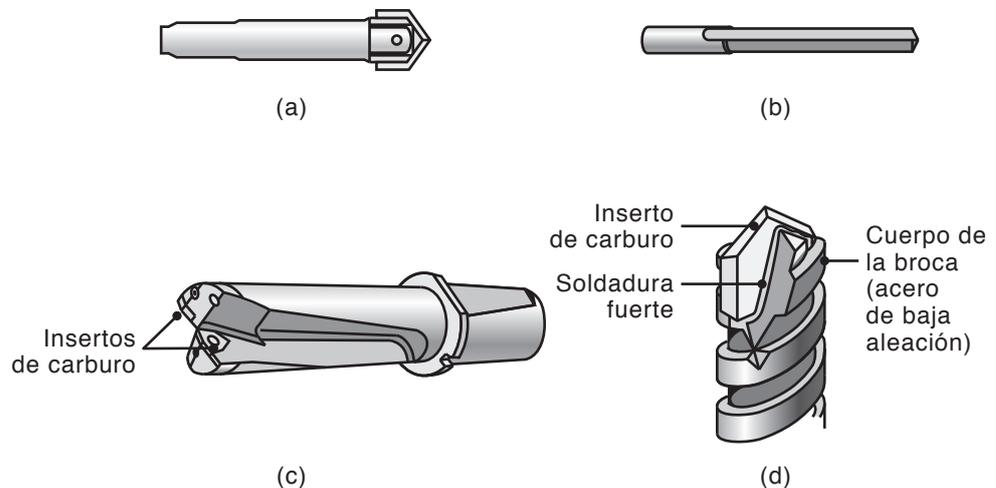


FIGURA 23.22 Varios tipos de brocas. (a) Broca de pala; (b) broca de canal recto; (c) broca con insertos de carburo indexables y (d) broca con punta de carburo.

rigidez mayor (por la ausencia de canales en el cuerpo de la broca), facilidad de esmerilar las rebabas de corte y un costo más bajo. Una broca similar es la *broca de canal recto* (figura 23.22b).

Las brocas de carburo sólido y de punta de carburo (figuras 23.22c y d) están hechas para perforar materiales duros como aleaciones de hierro; metales de alta temperatura; inclusive materiales abrasivos como el concreto y el ladrillo (llamadas *brocas con punta tipo cigüeñal*) y materiales compuestos con refuerzos de fibra contra la abrasión, como el vidrio y el grafito.

Taladrado de cañones. Originalmente se desarrollaron para taladrar barriles de armas, el taladrado de cañones se utiliza para taladrar barrenos profundos; requiere una broca especial, como se ilustra en la figura 23.23. Las razones profundidad a diámetro de los barrenos producidos pueden ser de 300:1 o aun mayores. La fuerza de empuje (fuerza radial que tiende a empujar a la broca hacia los lados) está balanceada por amortiguamientos de rodamientos en la broca que se deslizan a lo largo de la superficie interior del barreno. En consecuencia, una broca de cañón se *autocentra*, característica importante para perforar barrenos rectos y profundos. Una variante de este proceso es la **trepanación de cañones** (que se describe más adelante), la cual usa una herramienta cortadora parecida a la broca de cañón, sólo que la herramienta tiene una perforación central.

Las velocidades de corte en el taladrado de cañones suelen ser elevadas y los avances son lentos. Es común que las tolerancias sean de alrededor de 0.025 mm (0.001 pulg.). El fluido de corte es forzado a pasar a gran presión a través de una perforación longitudinal (pasaje) en el cuerpo de la broca (figura 23.22a). Además de enfriar y lubricar la pieza de trabajo, el fluido drena las virutas que de otro modo quedarían atrapadas en la profunda cavidad que se taladra, por lo que interferirían gravemente con la operación de barrenado.

Trepanación. En la *trepanación* (del griego *trypanon*, que significa “hacer una perforación” o “barreno”), la herramienta de corte (figura 23.24a) produce un orificio al remover una pieza en forma de disco (núcleo), por lo general de caras planas. La perforación así

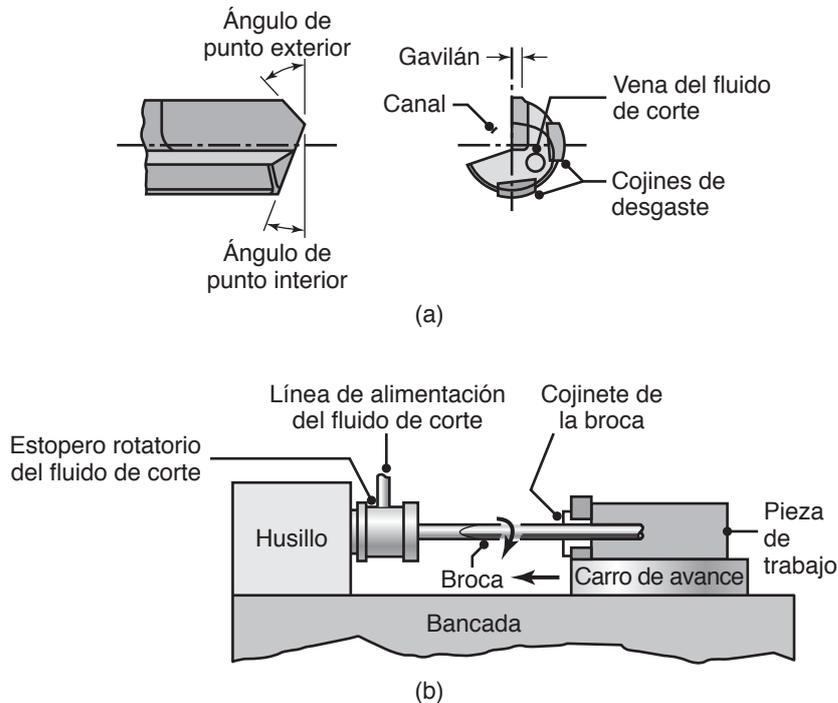


FIGURA 23.23 (a) Broca de cañón; se aprecian varias características. (b) Ilustración esquemática de la operación de taladrado de barril.

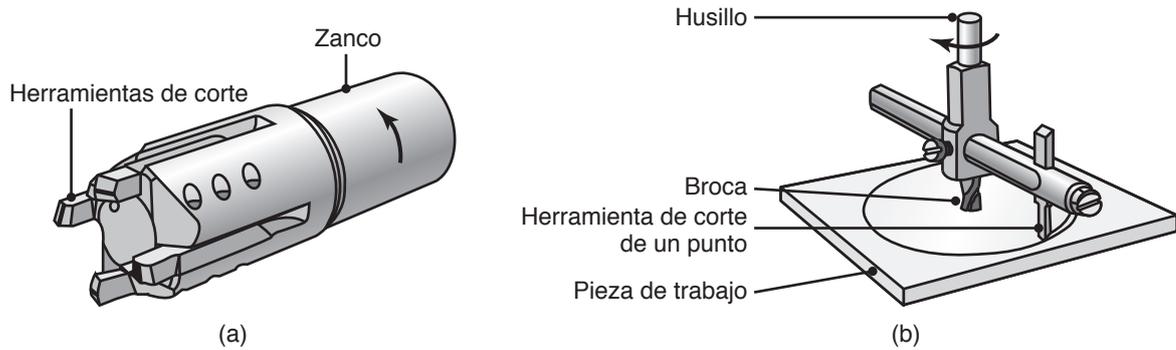


FIGURA 23.24 (a) Herramienta de trepanación. (b) Trepanación con herramienta de corte de un punto con broca montada.

producida ocurre sin que el material que se retira se convierta en viruta, como en el taladrado. El proceso de trepanación puede usarse para hacer discos de hasta 250 mm (10 pulg) de diámetro a partir de láminas planas, placas o miembros estructurales como vigas I. También puede usarse para hacer ranuras circulares en las cuales se han de colocar anillos O (como en la figura 23.1f). La trepanación se puede efectuar en tornos, taladros de banco, u otras máquinas herramienta, usando herramientas de un solo punto o de varios, como se ilustra en la figura 23.24b.

23.5.2 Tasa de remoción de material en el taladrado

La *tasa de remoción de material* (MRR) en el taladrado es el volumen de material retirado por unidad de tiempo. Para una broca de diámetro D , el área de la sección transversal del barreno perforado es $\pi D^2/4$. La velocidad de la broca perpendicular a la pieza de trabajo es el producto del avance, f (la distancia que penetra la broca en una revolución), y la velocidad rotacional, N , donde $N = V/\pi D$. Por lo que,

$$\text{MRR} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) f N. \quad (23.4)$$

23.5.3 Fuerza de empuje y torque

La *fuerza de empuje* en el taladrado actúa en forma perpendicular al eje del barreno; si esta fuerza es excesiva puede hacer que la broca se doble o rompa. Una fuerza de empuje excesiva también distorsiona la pieza de trabajo, en particular si no tiene suficiente rigidez (como es el caso de las estructuras metálicas de lámina delgada), o puede hacer que la pieza de trabajo se deslice en el dispositivo de sujeción de la pieza de trabajo.

La fuerza de empuje depende de factores como (a) la resistencia del material de la pieza de trabajo; (b) el avance; (c) la velocidad rotacional; (d) el diámetro de la broca; (e) la geometría del barreno y (f) los fluidos de corte. Las fuerzas de empuje por lo común varían de unos pocos newtons para brocas pequeñas a 100 kN (23.5 klb) en la perforación de materiales de alta resistencia usando brocas largas.

Par (torque). En el taladrado el conocimiento del *par* es esencial para estimar el requerimiento de potencia; sin embargo, es difícil de calcular debido a los muchos factores involucrados. El par puede estimarse a partir de los datos de la tabla 21.2, si se nota que la potencia disipada durante el taladrado es el producto del torque por la velocidad rotacional, y también es igual al producto de la energía específica y de la tasa de remoción del material. En el taladrado, el par puede ser tan alto como 4000 N-m (3000 lb-pies).

EJEMPLO 23.4 Tasa de remoción de material y par en el taladrado

Dado: Se perfora un barreno en un bloque de aleación de magnesio con una broca de 10 mm, a una velocidad de 0.2 mm/rev y con el husillo girando a $N = 800$ rpm.

Se solicita: Calcular la tasa de remoción de material y el par que se ejerce sobre la broca.

Respuesta: La tasa de remoción de material se calcula con la ecuación (23.4):

$$\begin{aligned} \text{MRR} &= \left[\frac{(\pi)(10)^2}{4} \right] (0.2)(800) \\ &= 12\,570 \text{ mm}^3/\text{min} = 210 \text{ mm}^3/\text{s}. \end{aligned}$$

Al consultar la tabla 21.2, se usa una potencia unitaria promedio de 0.5 W-s/mm^3 para las aleaciones de magnesio. Entonces, la potencia requerida es

$$\text{Potencia} = (210)(0.5) = 105 \text{ W}$$

La potencia es el producto del par sobre la broca y la velocidad rotacional, la cual en este caso es $(800)(2\pi)(60) = 83.8$ radianes por segundo. Observemos que $W = J/s$ y $J = \text{N-m}$,

$$T = \frac{105}{83.8} = 1.25 \text{ N-m}.$$

23.5.4 Materiales y tamaños de broca

Por lo general las brocas están hechas con acero de alta velocidad (M1, M7 y M10) y carburos sólidos o con puntas de carburo, generalmente de K20 (C2), como se ilustran en las figuras 23.22c y d. Actualmente es común que las brocas estén recubiertas con nitruro de titanio o carbonitruro de titanio para una mayor resistencia al desgaste, como se describió en la sección 22.5. Las brocas recubiertas de diamante policristalino se utilizan para producir barrenos en plásticos de fibras reforzadas más rápido. Por su alta resistencia al desgaste se pueden perforar varios miles de barrenos con poco daño en el material de la pieza de trabajo.

Aunque los desarrollos son continuos, los tamaños estándar de las brocas de giro consisten básicamente en las siguientes series:

- **Numérico:** Núm. 97 (0.0059 pulg) a núm. 1 (0.228 pulg).
- **Letra:** A (0.234 pulg) a Z (0.413 pulg).
- **Fracionario:** Zanco recto de $\frac{1}{64}$ a $1\frac{1}{4}$ (en incrementos de $\frac{1}{64}$ de pulg) a $1\frac{1}{2}$ pulg (en incrementos de $\frac{1}{32}$ de pulg) y las brocas más largas con incrementos mayores. El ahusamiento del eje va de $\frac{1}{8}$ a $1\frac{3}{4}$ (en incrementos de $\frac{1}{64}$) a 3.5 pulg (en incrementos de $\frac{1}{16}$ de pulg).
- **Milimétrico:** De 0.05 mm (0.002 pulg) en incrementos de 0.01 mm.

23.5.5 La práctica del taladrado

Las brocas y herramientas semejantes para hacer perforaciones se suelen sujetar en un portabrocas, el cual se puede cerrar con o sin llaves. Existen portabrocas y sujetadores con varias características de cambio rápido que no requieren que se detenga el husillo, para su empleo en la producción de maquinaria.

Debido a que no se tiene una acción de centrado, al principio de la operación la broca tiende a “caminar” sobre la superficie de la pieza de trabajo, problema que es particularmente grave con las brocas largas de pequeño diámetro, y puede ocasionar una falla. Para comenzar adecuadamente una perforación, la broca debe guiarse, utilizando accesorios tales como cojinetes, para evitar que se flexione lateralmente. Se puede hacer un pequeño barreno de inicio con una *broca de centrado*, por lo general con un ángulo de punto de 60° , o el punto de la broca puede ser de forma *S* (llamado *punto helicoidal* o *espiral*). Esta forma tiene una característica de autocentrado, lo que elimina la necesidad de centrar la broca, y produce barrenos exactos junto con la mejora de la vida de la broca. Estos factores son de importancia particular en la producción automatizada con máquinas CNC, en las cuales la práctica habitual es usar una *broca piloto*. Para

mantener la broca más centrada se hace coincidir el ángulo de la broca piloto con el de la broca. Entre otras alternativas para minimizar la “caminata” de la broca están el usar un punto de punzón para producir una impresión inicial donde comience el taladrado, o bien incorporar directamente hoyuelos u otras características en la fundición o forja de las piezas de trabajo.

Recomendaciones para el taladrado. En la tabla 23.12 se dan los rangos recomendables para las velocidades de perforación y avances. La velocidad es la *velocidad superficial* de la broca en su periferia; por lo que una broca de 0.5 pulg (12.7 mm) que rota a 300 rpm tiene una velocidad superficial de

$$V = \left(\frac{0.5}{2} \text{ pulg} \right) (300 \text{ rev/min}) (2\pi \text{ rad/rev}) \left(\frac{1}{12} \text{ pies/pulg} \right) = 39 \text{ pies/min} = 12 \text{ m/min.}$$

En la perforación de barrenos menores que 1 mm (0.040 pulg) de diámetro, las velocidades rotacionales están en el rango de hasta 30 000 rpm, lo que depende del material de la pieza de trabajo. El *avance* en el taladrado es la distancia que recorre la broca en la pieza de trabajo por revolución. Por ejemplo, la tabla 23.11 recomienda que para la mayoría de materiales de la pieza de trabajo, una broca de 1.5 mm (0.060 pulg) de diámetro debe tener un avance de 0.025 mm/rev. Si la columna de la velocidad en la tabla indica que la broca debe rotar a, digamos, 2000 rpm, entonces la broca debe penetrar en el material de trabajo a una velocidad lineal de $(0.025 \text{ mm/rev})(2000 \text{ rev/min}) = 50 \text{ mm/min} = 2 \text{ pulg/min}$.

La *remoción de virutas* durante el taladrado puede ser difícil, en especial para barrenos profundos hechos en materiales suaves y dúctiles. La broca debe retraerse periódicamente (maniobra que se denomina *picotear*) para eliminar las virutas que se hubieran acumulado a lo largo de los canales. De otro modo, la broca podría romperse debido al par excesivo, o “caminar” fuera de su ubicación y producir un barreno sin forma. En la tabla 23.13 se da una guía general de las causas probables de los problemas en las operaciones de taladrado.

Reacondicionamiento de la broca. Las brocas se *reacondicionan* por esmerilado, ya sea manual o con accesorios especiales para tener una mejor exactitud y productividad. El reacondicionamiento apropiado de las brocas es importante, en particular con la manufactura automatizada en máquinas de CNC. El esmerilado a mano es difícil y

TABLA 23.12

Recomendaciones generales para velocidades y avances en el taladrado

Material de la pieza de trabajo	Diámetro de la broca					
	Velocidad superficial		Avance, mm/rev (pulg/rev)		Velocidad, rpm	
	m/min	pies/min	1.5 mm (0.060 pulg)	12.5 mm (0.5 pulg)	1.5 mm (0.060 pulg)	12.5 mm (0.5 pulg)
Aleaciones de aluminio	30-120	100-400	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	6400-25 000	800-3000
Aleaciones de magnesio	45-120	150-400	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	9600-25 000	1100-3000
Aleaciones de cobre	15-60	50-200	0.025 (0.001)	0.25 (0.010)	3200-12 000	400-1500
Aceros	20-30	60-100	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	4300-6400	500-800
Aceros inoxidables	10-20	40-60	0.025 (0.001)	0.18 (0.007)	2100-4300	250-500
Aleaciones de titanio	6-20	20-60	0.010 (0.0004)	0.15 (0.006)	1300-4300	150-500
Hierros fundidos	20-60	60-200	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	4300-12 000	500-1500
Termoplásticos	30-60	100-200	0.025 (0.001)	0.13 (0.005)	6400-12 000	800-1500
Termofijos	20-60	60-200	0.025 (0.001)	0.10 (0.004)	4300-12 000	500-1500

Nota: A medida que aumenta la profundidad del barreno deben reducirse las velocidades y avances; la selección de estos parámetros también depende del acabado superficial específico que se requiera.

TABLA 23.13

Guía general de problemas en las operaciones de taladrado	
Problema	Causas probables
Rotura de la broca	Broca sin filo, la broca se fuerza contra la perforación porque las virutas bloquean los canales, avance demasiado rápido, ángulo de gavilanes muy pequeño.
Desgaste excesivo de la broca	Velocidad de corte muy alta, fluido de corte ineficaz, ángulo de ataque demasiado alto, la broca fue quemada y perdió resistencia cuando se afiló.
Barreno con ahusamiento	Broca desalineada o doblada, los labios no son iguales, el alma de la broca no está centrada.
Barreno más grande	Igual que el anterior, husillo de la máquina flojo, borde no centrado del cincel, fuerza lateral sobre la pieza de trabajo.
Mal acabado de la superficie de la perforación	Broca sin filo, fluido de corte ineficaz, soldadura del material de la pieza de trabajo en el borde de la broca, centrado impropio de la broca, alineación incorrecta.

requiere una habilidad considerable con el fin de producir bordes de corte simétricos. El esmerilado con herramientas es exacto y se hace en esmeriles especiales controlados por computadora. Las brocas cubiertas también pueden recubrirse.

Medición de la vida de la broca. La vida de la broca, así como la de la llave (vea la sección 23.7), se suelen medir por el número de barrenos taladrados antes de que la broca pierda su filo y tenga que reacondicionarse o reemplazarse. La *vida de la broca* se puede determinar en forma experimental si primero se sujeta un bloque de material en un dinamómetro apropiado o transductor de fuerza y después se barrena cierto número de orificios mientras se registra el par o la fuerza de empuje durante cada operación sucesiva de taladrado. Después de haber practicado varios barrenos, el par y la fuerza comienzan a incrementarse porque la broca está perdiendo filo. La vida de la broca es la cantidad de perforaciones que se hacen hasta que comienza esta transición de las fuerzas. Otras técnicas, como el monitoreo de la vibración y las emisiones acústicas (sección 21.5.4), también se pueden usar para determinar la vida de la broca.

23.5.6 Taladros

La máquina barrenadora más común es el taladro vertical, cuyos componentes principales se ilustran en la figura 23.25a. La pieza de trabajo se coloca en una mesa ajustable, ya sea con mordazas directamente en las ranuras y barrenos de la mesa o con un tornillo de banco, el cual en sí mismo está sujeto a la mesa. La broca se hace descender manualmente con una manivela o con un avance automático a las tasas especificadas. El avance manual requiere cierta habilidad para juzgar la tasa de avance apropiada.

Los taladros verticales se suelen diseñar para el diámetro más grande de la pieza de trabajo que puede recibir la mesa, y es común que varíen entre 150 y 1250 mm (6 a 50 pulg). Con el fin de mantener velocidades de corte apropiadas en los bordes cortadores de las brocas, la velocidad del husillo del taladro tiene que ser ajustable con objeto de dar acomodo a diferentes tamaños de brocas. Los ajustes se efectúan por medio de poleas, engranes o motores de velocidad variable.

Los taladros van desde los sencillos de tipo banco, utilizados para perforar barrenos de pequeño diámetro, hasta los grandes *taladros radiales* (figura 23.25b), que pueden recibir piezas de trabajo grandes. La distancia entre la columna y el centro del husillo puede ser de hasta 3 m (10 pies). El cabezal de los *taladros universales* puede girar para perforar barrenos a cierto ángulo. Actualmente los taladros cuentan con máquinas triaxiales de control numérico, en los cuales las operaciones se realizan en forma automática y en la secuencia establecida usando una torreta (figura 23.26), la cual puede llevar varias y distintas herramientas de perforación.

Los taladros con husillos múltiples (**taladros múltiples**) se utilizan para ejecutar operaciones de alta tasa de producción y son capaces de perforar, en un ciclo, hasta 50 barrenos de distintos tamaños, profundidades y ubicaciones. Estas máquinas también se emplean

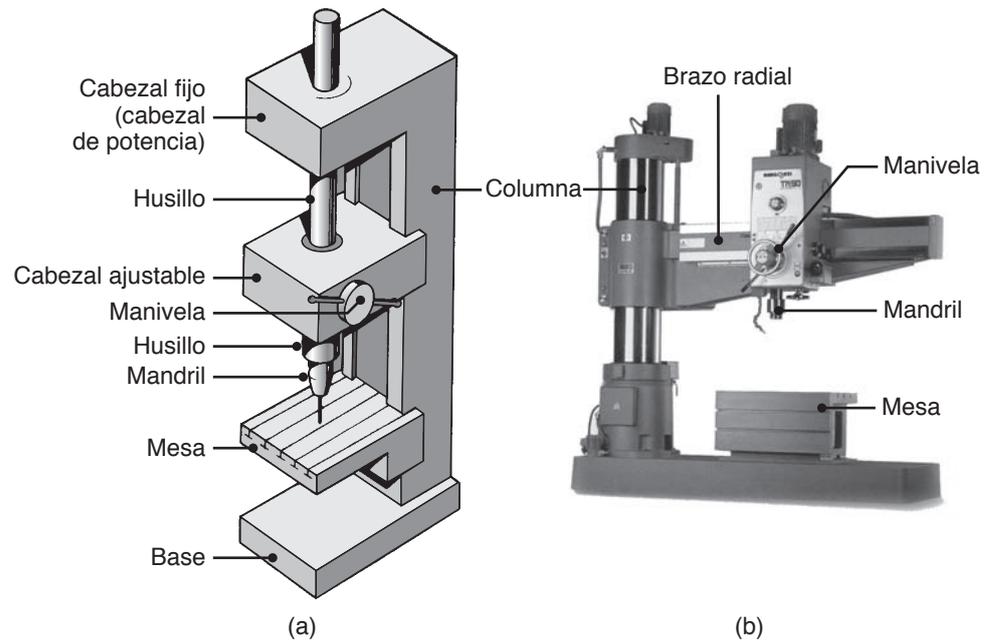


FIGURA 23.25 (a) Ilustración esquemática de un taladro vertical. (b) Taladro radial.
Fuente: (b) Cortesía de Willis Machinery and Tools.

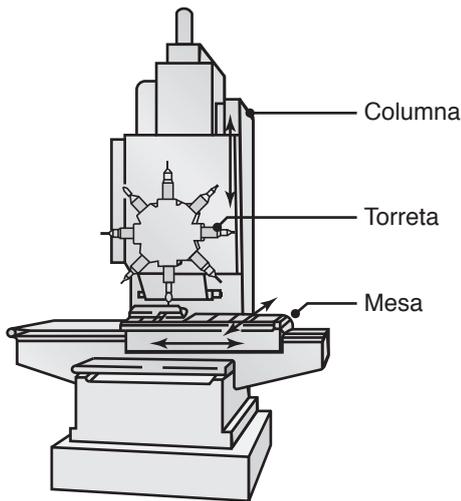


FIGURA 23.26 Taladro triaxial de control numérico computarizado; la torreta porta hasta ocho herramientas diferentes, como brocas, machuelos y rimas.

para operaciones de rimado y abocardado. Los taladros múltiples han sido sustituidos en su mayoría por *taladros de torreta de control numérico*.

Los *dispositivos de sujeción del trabajo* para el barrenado son esenciales para garantizar que la pieza de trabajo se ubique y sujete adecuadamente, para evitar que se deslice o gire durante el taladrado. Estos dispositivos están disponibles en distintos diseños, con características importantes como la ubicación de tres puntos para más exactitud y el trabajo de sujeción en tres dimensiones para un ajuste seguro (vea también la sección 37.8).

23.5.7 Consideraciones de diseño para el taladrado

Los lineamientos básicos de diseño para el taladrado son los siguientes:

- Los diseños deben permitir que los barrenos se perforen en superficies planas y perpendiculares al movimiento de la broca; de otra manera, ésta tiende a doblarse y el barreno no se ubicará con exactitud. Las superficies de salida del barreno también deben ser planas.
- El diseño de los fondos de las perforaciones debe ajustarse a los ángulos estándar del punto de la broca, siempre que esto sea posible; por tanto deben evitarse los fondos planos o las formas irregulares.
- Se prefieren los barrenos que traspasan la pieza a los que son ciegos.

Si se especifican perforaciones con grandes diámetros, la pieza de trabajo debe tener un barreno preexistente, de preferencia hecho durante la fabricación de la parte, por fundición, metalurgia de polvos o formado.

- Cuando no sea práctico producir perforaciones preexistentes deben proveerse guías de punzón para reducir la tendencia de la broca a caminar.
- Las partes deben diseñarse de modo que todos los barrenos se ejecuten con un mínimo de arreglos y sin que haya necesidad de reposicionar la pieza de trabajo.

- Los barrenos ciegos deben perforarse a mayor profundidad que las operaciones subsiguientes de rimado o machuelado que se vayan a tener que maquinar.

23.6 Rimado y rimas

El *rimado* (*escariado*) es una operación que se utiliza para (a) practicar un barreno existente con mayor exactitud dimensional y que puede lograrse con el solo taladrado y (b) mejorar su acabado superficial. Los barrenos más exactos en las piezas de trabajo por lo general se producen en la siguiente secuencia de operaciones:

1. Centrado.
2. Taladrado.
3. Mandrinado.
4. Rimado.

Para una exactitud y un acabado superficial aun mejores, los *barrenos* pueden *pulirse* y *asentarse* internamente (vea las secciones 26.4 y 26.7).

Una *rima* (figura 23.27a) es una herramienta cortadora de bordes múltiples, con bordes acanalados rectos o helicoidales que remueven muy poco material. Para metales suaves, una rima por lo general retira un mínimo de 0.2 mm (0.008 pulg) sobre el diámetro de un barreno perforado; para metales más duros se remueve alrededor de 0.13 mm (0.005 pulg). Los intentos de remover capas más pequeñas pueden ser perjudiciales, ya que la rima puede dañarse o bruñirse la superficie del barreno (vea también la figura 21.22 como analogía); en este caso sería preferible el asentado. En general, las velocidades del rimado son la mitad de las de un barreno del mismo tamaño y tres veces la tasa de avance.

Las *rimas manuales* son rectas o tienen un extremo con ahusamiento en el primer tercio de su longitud. Existen dos *tipos de rimadoras*, también llamadas *rimadoras de máquina* debido a que están montadas en un plato y son operadas por una máquina: (a) las *rimadoras de rosa* tienen bordes cortadores con amplios márgenes y sin alivio (figura 23.27a); remueven cantidades considerables de material y hacen un verdadero orificio

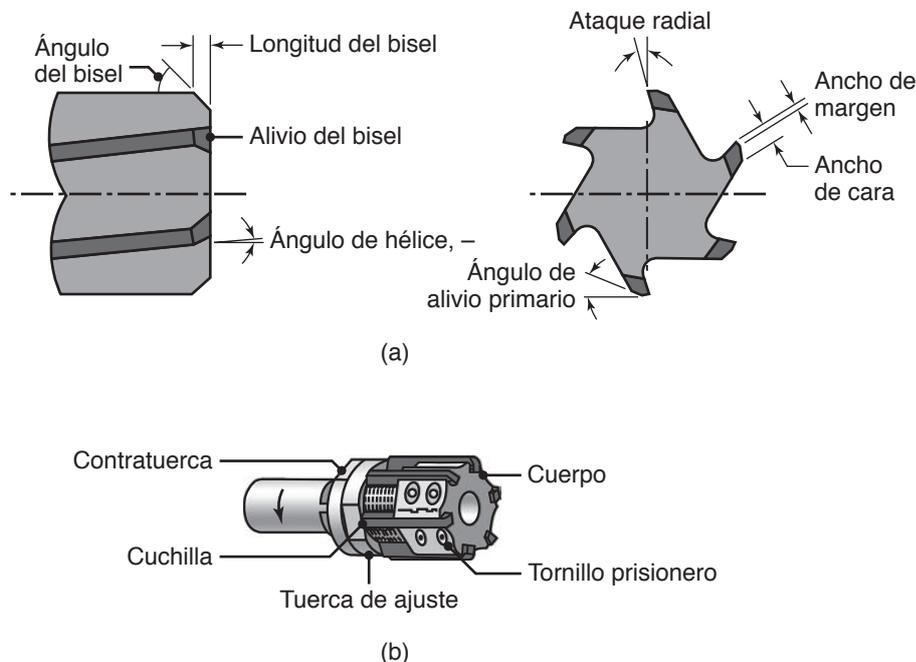


FIGURA 23.27 (a) Terminología de una rimadora helicoidal. (b) Rimador ajustable con insertos de cuchilla.

para el rimado en canal. (b) Las *rimadoras de canal* tienen pequeños márgenes y alivio, con un ángulo de ataque de alrededor de 5°; por lo general se usan para cortes ligeros de aproximadamente 0.1 mm (0.004 pulg) en el diámetro de la perforación.

Las *rimas de concha* son huecas, están montadas en un armazón y por lo general se usan para orificios mayores de 20 mm (0.75 pulg). Las *rimas de expansión* son ajustables, para variaciones pequeñas en el tamaño del orificio y también para compensar el desgaste de los bordes cortadores de la rima. Las *rimas ajustables* (figura 23.27b) pueden prepararse para diámetros específicos de la perforación y por ello son versátiles.

Las rimas pueden sujetarse con rigidez, como en un plato, o *flotar* en sus dispositivos de sujeción para garantizar la alineación, o bien *pilotarse* en cojinetes de guía situados arriba y abajo de la pieza de trabajo. Un desarrollo adicional en las rimas consiste en un *soñador*, herramienta que combina el taladrado y el rimado. El extremo de la herramienta en primer lugar barrena un orificio y el resto de la misma herramienta realiza la operación de rimado. Un desarrollo similar involucra el taladrado y el machuelado en un paso, usando una sola herramienta.

Es común que las rimas estén hechas de aceros de alta velocidad (M1, M2 y M7) o de carburos sólidos (K20, C2), o tengan bordes de corte de carburo. El mantenimiento y reacondicionamiento de las rimas son importantes para la exactitud de la perforación y el acabado de la superficie.

23.7 Machuelado y machuelos



Código QR 23.3 Operación de machuelado. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

Las roscas interiores en las piezas de trabajo pueden producirse por medio de *machuelado*, un *machuelo* es una herramienta de corte de viruta con múltiples dientes de corte (figura 23.28a). Los machuelos por lo general están disponibles con dos, tres o cuatro canales. El que se produce más comúnmente es el de punto espiral de dos canales. Las fuerzas en éste fuerzan la viruta hacia el orificio, de modo que la herramienta necesita retirarse sólo al final del corte. Los machuelos de tres canales son más fuertes porque cabe más material en ellos. Los tamaños de los machuelos llegan hasta los 100 mm (4 pulg), aunque pueden maquinarse roscas más grandes en una fresa o centro de maquinado (vea la figura 24.2f).

Los *machuelos abusados (cónicos)* están diseñados para reducir el par requerido para el ensanchamiento de orificios que traspasan la pieza. Los *machuelos de fondo* son para roscar barrenos ciegos en toda su profundidad. Los *machuelos colapsables* se utilizan en perforaciones de diámetro grande; una vez terminado el roscado, el machuelo se colapsa mecánicamente y se retira de la perforación sin tener que girarlo en el interior, como ocurre con los machuelos normales.

La remoción de virutas puede ser un problema importante durante el machuelado, por los pequeños claros involucrados. Si las virutas no se retiran del todo, el par se incrementa considerablemente y puede romper el machuelo. El uso de un fluido de corte y el retiro periódico del machuelo del barreno son medios efectivos de retirar la viruta y

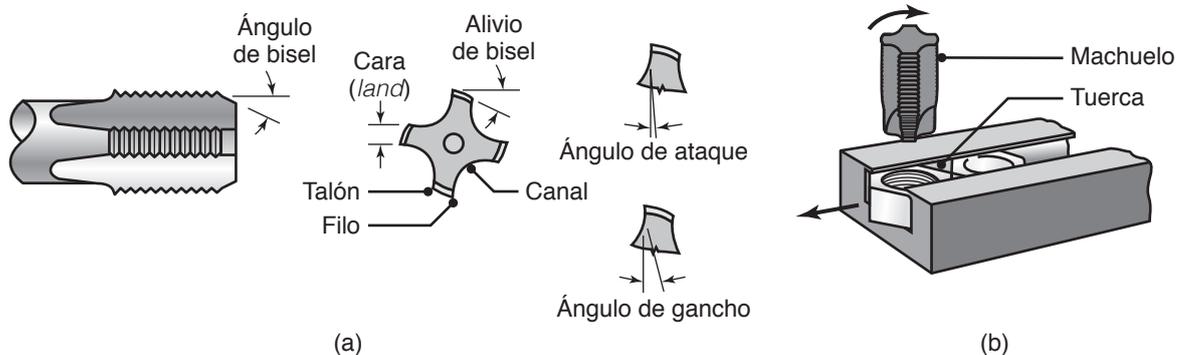


FIGURA 23.28 (a) Terminología para un machuelo. (b) Machuelado de tuercas de acero en producción.

mejorar la calidad del barrenado roscado. Para una mayor productividad del machuelado, se puede combinar el taladrado con el machuelado en una sola operación (*barrenado*) con una herramienta única. La herramienta tiene una sección de broca en su extremo, seguida de una sección de machuelado. El machuelado puede hacerse manualmente o con máquinas como (a) taladros; (b) tornos; (c) destornilladores automáticos y (d) fresadoras de CNC verticales que combinan la rotación relativa correcta con el avance longitudinal.

También hay machueladoras especiales, con características para hacer operaciones múltiples de machuelado. Se usan mucho las cabezas machueladoras de husillos múltiples, en particular en la industria automotriz, donde de 30 a 40% de las operaciones de maquinado involucran el machuelado de barrenos. En la figura 23.28b se muestra un sistema sencillo para roscar tuercas en forma automática.

La vida del machuelo se puede determinar con la misma técnica utilizada para medir la de las brocas. Con una lubricación adecuada la vida de los machuelos puede ser de hasta 10 000 barrenos. Por lo general están hechos de aceros de alta velocidad (M1, M2, M7 y M10). La productividad en las operaciones de machuelado se puede mejorar por medio del *machuelado de alta velocidad*, con velocidades superficiales tan altas como 100 m/min (350 pies/min). Ahora se utilizan sistemas de machuelado *autorreversibles* con modernas máquinas herramientas controladas por computadora. Las velocidades de operación pueden ser tan grandes como de 5000 rpm, aunque las velocidades reales de corte en la mayoría de aplicaciones son considerablemente menores. Los tiempos de ciclo por lo general son del orden de 1 a 2 segundos.

Algunos sistemas de machuelado ahora tienen capacidades para dirigir el fluido de corte a la zona de corte a través del husillo y una perforación en el machuelo, lo cual también ayuda a expulsar las virutas del barrenado que se rosca. El **machuelado sin viruta** es un proceso de roscado interno por rodamiento que utiliza un machuelo formador, descrito en la sección 13.5.

CASO DE ESTUDIO 23.2 Retenedor para tornillo en hueso

En la figura 23.29a se muestra un implante en una vértebra cervical. En el caso en que un paciente requiera la fusión de una vértebra en uno o más niveles de la columna, este implante actúa como un estabilizador interno al disminuir la cantidad de movimiento en la región, y con ello ayuda a promover la fusión exitosa. La placa se adhiere al asiento anterior de la columna con tornillos óseos que pasan por la placa y se introducen en el hueso. La parte bajo la superficie de la placa tiene una superficie muy rugosa que ayuda a que la placa permanezca en su lugar mientras se insertan los tornillos óseos.

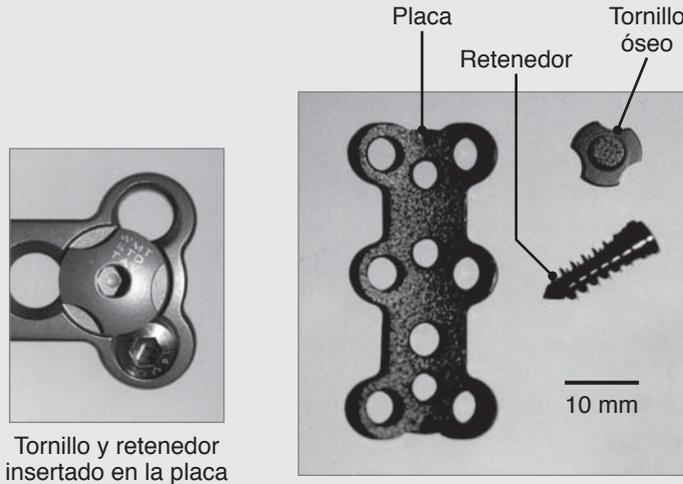
Una preocupación con este tipo de implante es la posibilidad de que los tornillos óseos se aflojen con el tiempo, debido a la carga normal y repetitiva por parte del paciente. En casos extremos esto puede dar como resultado la expulsión del tornillo, con su cabeza fuera de la placa, condición que es obviamente indeseable. El implante descrito usa un retenedor para impedir que el tornillo óseo se salga de la placa, como se ilustra en la mitad izquierda de la figura 23.29b.

El retenedor tiene varias características de diseño que son esenciales para que funcione correctamente, y sin complicar el procedimiento quirúrgico. Para facilitar el uso en cirugía, la placa ya viene provista con retenedores, con las ranuras circulares alineadas con los

barrenos para los tornillos. Este arreglo permite que el cirujano inserte los tornillos sin interferir con el retenedor. Una vez insertados los tornillos, el cirujano gira el retenedor algunos grados de modo que capture la cabeza de cada tornillo. Con el fin de asegurar la orientación apropiada del retenedor en la placa, la rosca de su eje debe comenzar en la misma ubicación axial que el punto *S* en la figura 23.29b.

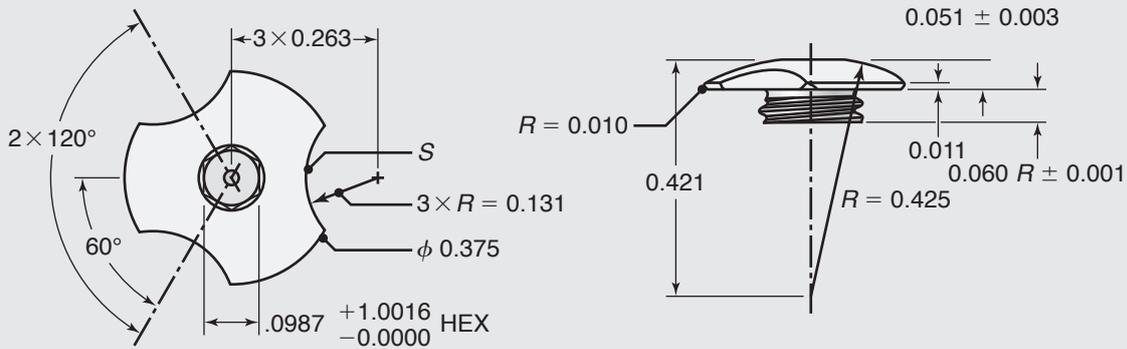
Los pasos de manufactura seguidos para producir esta parte se muestran en la figura 23.29b. En primer lugar, se coloca un cilindro de 0.5 pulg de diámetro de Ti-6Al-4V, en un torno de CNC y se refrenta. Después, el área roscada se convierte al diámetro necesario para maquinar las cuerdas. La rosca se gira sobre el eje, pero en una longitud mayor de la que se requiere, debido a las dificultades de obtener cuerdas de alta calidad en el comienzo del maquinado. Después se da a la parte superior el diámetro requerido y se maquina con un radio de 0.10 pulg en el lado inferior de la cabeza. Se retira la parte, se inspecciona y se coloca en otro torno de CNC donde se refrenta a la longitud especificada. Después se maquina el radio esférico de la parte superior, se tala el barrenado central y se fresa la cabeza excéntrica. Se retira la tapa y se inspecciona, y si no se logró la longitud deseada se le da la dimensión final (sección 26.7).

(continúa)



Tornillo y retenedor insertado en la placa

(a)



Nota: La rosca debe comenzar en el punto S para garantizar que el retenedor interfiera con el tornillo.

(b)

FIGURA 23.29 (a) Implante en una vértebra cervical en que se muestran los componentes del sistema; (b) dimensiones del tornillo óseo (todas las dimensiones están en pulgadas).

En este punto se coloca el retenedor en una fresadora de CNC, con el uso de un arreglo de diseño especial que consiste básicamente en un barreno ahusado y roscado. Con la aplicación cuidadosa de un par determinado en el retenedor, cuando se coloca en el dispositivo, puede controlarse con toda exactitud la ubicación inicial de las cuerdas. Una vez ubicada la tapa en el aditamento, se maquinan las tres muescas circulares como en el dibujo. Después se quitan las rebabas al retenedor

volteándolo para eliminar todas las esquinas afiladas y se aplana el fondo para que ajuste con el lado inferior de la placa. Por último, se anodizan las partes (sección 34.10) y se esterilizan para obtener la compatibilidad biológica deseada.

Fuente: Cortesía de J. Mankowski y B. Pyszka, Master Metal Engineering Inc., y C. Lyle y M. Handwerker, Wright Medical Technology, Inc.

RESUMEN

- Los procesos de maquinado que en general producen perfiles circulares externos e internos son el torneado, mandrinado, taladrado y machuelado. Por la naturaleza tridimensional de estas operaciones, el desalajo de la viruta y su control son considera-

ciones importantes. La remoción de la viruta puede ser un problema significativo, en especial en el taladrado y machuelado y puede llevar a la rotura de la herramienta.

- La optimización de cada operación de maquinado requiere la comprensión de las interrelaciones entre los parámetros de diseño (formado de la parte, exactitud dimensional y acabado de la superficie) y los del proceso (velocidad de corte, avance y profundidad de corte), material y forma de la herramienta, uso de fluidos de corte y secuencia de las operaciones por realizar.
- Las partes en bruto pueden ser producidas por fundición, forja, extrusión o metalurgia de polvos. Cuanto más aproximado sea el material original a la forma final deseada (forma casi neta), menos numerosos e intensos serán los procesos de maquinado subsiguientes que se requieran.

TÉRMINOS CLAVE

Ángulo de alivio	Cortes de acabado	Moletado	Taladrado
Ángulo de ataque	Cortes de desbaste	Perforación de orificios	Taladrado de cañón
Ángulo de ataque lateral	Fuerza de avance	Placa frontal	Taladro de columna
Ángulo de ataque posterior	Herramientas formadoras	Plato de sujeción	Tasa de remoción de material
Ángulo de filo de corte	Machuelado	Plato de sujeción con potencia	Torneado
Bancada	Mandrill	Radio de la nariz	Tornillo sin fin
Barra de avance	Mandrinado	Reacondicionamiento	Torno de motor
Boquilla	Manejo de viruta	Refrentado o careado	Torno de torreta
Broca helicoidal	Máquina automática para barras	Rima (escariador)	Tornos
Cabezal	Máquina para mandrinar	Rimado (escariado)	Trepanado
Carro	Maquinado seco	Roscado	Tronzado
Contrapunto		Roscas de tornillo	Vida de la broca

BIBLIOGRAFÍA

- ASM *Handbook*, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.
- Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 3a. ed., Marcel Dekker, 2005.
- Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
- Byers, J. P. (ed.), *Metalworking Fluids*, 2a. ed., CRC Press, 2006.
- Hoffman, E. G., *Jigs and Fixture Design*, 5a. ed., Industrial Press, 2003.
- Joshi, P. H., *Machine Tools Handbook*, McGraw-Hill, 2008.
- Knight, W. A. y Boothroyd, G., *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, 3a. ed., Marcel Dekker, 2006.
- Krur, S. F. y Check, A. F., *Technology of Machine Tools*, 6a. ed., Glencoe Macmillan/McGraw-Hill, 2009.
- Lopez, L. N. y Lamikiz, A. (eds.), *Machine Tools for High Performance Machining*, Springer, 2009.
- Stout, K. J., Davis, E. J. y Sullivan, P. J., *Atlas of Machined Surfaces*, Chapman y Hall, 1990.
- Walsh, R. A., *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook*, 3a. ed., McGraw-Hill, 2006.

PREGUNTAS DE REPASO

- 23.1** Describa los tipos de operaciones de maquinado que pueden efectuarse en un torno.
- 23.2** ¿Qué es el torneado?, ¿qué clase de virutas se producen en el torneado?
- 23.3** ¿Qué es la fuerza de empuje en el torneado? ¿Qué es la fuerza de corte? ¿Cuál se utiliza para calcular la potencia requerida?
- 23.4** ¿Cuáles son los componentes de un torno?
- 23.5** (a) ¿Qué es un torno trazador? (b) ¿Qué es una máquina de barra automática?
- 23.6** Describa las operaciones que se pueden llevar a cabo en un taladro vertical.
- 23.7** ¿Por qué se desarrollaron los platos de sujeción de potencia?
- 23.8** Explique por qué son difíciles de ejecutar en un torno operaciones como el mandrinado y el machuelado.

23.9 ¿Por qué es común que los tornos de torreta estén equipados con más de una torreta?

23.10 Describa las diferencias entre mandrinar una pieza de trabajo en un torno y hacer el mandrinado en una mandrinadora horizontal.

23.11 ¿Cómo se determina la vida de una broca?

23.12 ¿Cuál es la diferencia entre una broca convencional y una de cañón?

23.13 ¿Por qué se efectúan las operaciones de mandrinado?

23.14 Explique las funciones de la mesa en un torno.

23.15 Describa las ventajas relativas de los dados de (a) auto-apertura y (b) tarraja para el roscado.

23.16 Explique cómo se cortan las roscas externas en un torno.

23.17 ¿Cuál es la diferencia entre un barreno ciego y uno que traspasa la pieza? ¿Cuál es el significado de esa diferencia?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

23.18 Explique el razonamiento que hay tras los diferentes lineamientos de diseño para el torneado.

23.19 Observe que en el texto se han usado los términos “resistencia de la herramienta” y “resistencia del material de la herramienta”. ¿Piensa que hay una diferencia entre ellos? Explique.

23.20 (a) Enuncie y explique los factores que contribuyen a tener un mal acabado de la superficie en los procesos descritos en este capítulo. (b) Mencione las ventajas y desventajas del torneado, en comparación con el extruido en frío de un eje.

23.21 Explique por qué la secuencia de taladrado, mandrinado y machuelado produce un barreno que es más exacto que el solo taladrar y rimar.

23.22 ¿Por qué se necesitarían las operaciones de maquinado aun para partes con forma casi neta hechas con precisión por medio de fundición, formado o metalurgia de polvos, como se describió en capítulos anteriores? Explique.

23.23 Una barra muy oxidada e irregular se gira en un torno. ¿Recomendaría usted una profundidad de corte pequeña o grande? Explique.

23.24 Describa las dificultades que pueden encontrarse en la sujeción de una pieza de trabajo hecha de un metal suave en un plato de tres mordazas.

23.25 (a) ¿Cambia la fuerza o par en el taladrado conforme aumenta la profundidad del barreno? Explique. (b) Las brocas suelen tener dos canales. Explique por qué.

23.26 Explique las semejanzas y diferencias en los lineamientos de diseño para el torneado y el mandrinado.

23.27 Describa las ventajas y aplicaciones de tener un husillo hueco en el cabezal de un torno.

23.28 Suponga que se le pide que haga una operación de mandrinado en una pieza de trabajo hueca de diámetro grande. ¿Usaría una mandrinadora horizontal o vertical? Explique.

23.29 Explique las razones de la tendencia principal que se ha observado en la producción de roscas por medio de formado, en oposición al corte de las roscas. ¿Cuáles serían las diferen-

cias, si las hubiera, en los tipos de roscas producidas y en sus características de rendimiento?

23.30 Describa sus observaciones con respecto al contenido de las tablas 23.2 y 23.4 y explique por qué se hacen esas recomendaciones en particular.

23.31 La nota al pie de la tabla 23.12 dice que a medida que aumenta el diámetro del barreno, las velocidades y avances de la broca deben reducirse. Explique por qué.

23.32 En la manufactura moderna, ¿qué tipos de virutas serían indeseables y por qué?

23.33 Dibuje las marcas de las herramientas que esperaría encontrar si una parte se (a) torneara; (b) redujera su diámetro con una herramienta formadora recta y (c) extruyera.

23.34 ¿Qué le preocuparía en el torneado de una parte de polvo metálico, como un eje elaborado con el proceso Osprey? (Vea la figura 17.21).

23.35 La severidad operacional para el rimado es mucho menor que la del machuelado, aun cuando ambos son procesos de maquinado interno. ¿Por qué?

23.36 Revise la figura 23.6 y comente los factores involucrados para determinar la altura de las zonas (velocidad de corte) para diferentes materiales de la herramienta.

23.37 Explique cómo permanecen centradas las brocas de cañón durante el taladrado. ¿Por qué hay un canal hueco, longitudinal, en ellas?

23.38 Comente sobre la magnitud del ángulo de ataque que se ilustra en la figura 23.4.

23.39 Si se usan insertos en una broca de golpe (vea la figura 23.22), ¿qué tan importante es el material del eje? Si lo fuera, ¿qué propiedades son importantes? Explique.

23.40 En relación con la figura 23.11b, y además de las herramientas mostradas, describa otros tipos de herramientas de corte que pueden situarse en los portaherramientas para realizar otras operaciones de maquinado.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

23.41 Calcule las mismas cantidades solicitadas en el ejemplo 23.1 para una aleación de titanio de alta resistencia y con $N = 700$ rpm.

23.42 Estime el tiempo de maquinado requerido para un desbaste de torneado de una barra cilíndrica de aleación de cobre, galvanizada, de 0.50 m de longitud, de un diámetro de 60 mm

a otro de 58 mm, usando una herramienta de acero de alta velocidad (vea la tabla 23.4). Estime el tiempo requerido para una herramienta de carburo no recubierto.

23.43 Una barra de hierro fundido de alta resistencia de 8 pulgadas de diámetro se gira en un torno a una profundidad de corte de $d = 0.050$ pulg. El torno está equipado con un motor

eléctrico de 15 hp y tiene una eficiencia mecánica de 80%. La velocidad del husillo es de 500 rpm. Estime el avance máximo que puede usarse antes de que el torno comience a atascarse.

23.44 En un taladro vertical que opera a 300 rpm se usa una broca de 0.30 pulg de diámetro. Si el avance es de 0.005 pulg/rev, ¿cuál es la tasa de remoción de material? ¿Cuál es la MRR si el diámetro de la broca se duplica?

23.45 En el ejemplo 23.4, suponga que el material de la pieza de trabajo es una aleación de aluminio de alta resistencia y el husillo opera a $N = 500$ rpm. Estime el par (torque) requerido para esta operación.

23.46 Con los datos del problema 23.45, calcule la potencia requerida.

23.47 Un cilindro de aluminio de 6 pulgadas de diámetro y 10 pulg de longitud va a reducir su diámetro a 4.5 pulg. Con las condiciones de maquinado normales que se dan en la tabla 23.4, estime el tiempo de maquinado si se usa una herramienta de carburo recubierto de TiN.

23.48 Un torno se prepara para maquinar un roscado en una barra de 120 mm de diámetro. El machuelo es de 1 mm por

10 mm. Se hace un corte con profundidad inicial de 4 mm, a una tasa de avance de 0.250 mm/rev y con una velocidad de husillo de 150 rpm. Calcule la tasa de remoción promedio de metal.

23.49 Suponga que el coeficiente de fricción es de 0.25, calcule la profundidad máxima de corte para el torneado de una aleación de aluminio duro en un torno de 20 hp (con 80% de eficiencia mecánica) con un ancho de corte de 0.25 pulg, ángulo de ataque de 0° y velocidad de corte de 300 pies/min. ¿Cuál es su estimación de la resistencia cortante del material?

23.50 Una parte cilíndrica de hierro fundido gris, con diámetro de 3 pulg, va a girarse en un torno a 500 rpm. La profundidad del corte es de 0.25 pulg y el avance es de 0.02 pulg/rev. ¿Cuál es la potencia mínima, en hp, que se requiere para esta operación?

23.51 Suponga que usted es un profesor que enseña los temas descritos en este capítulo y que para probar la comprensión de los estudiantes va a aplicar un cuestionario sobre los aspectos numéricos. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

23.52 ¿Consideraría usted los procesos de maquinado descritos en este capítulo como de forma neta, de modo que no requirieran más procesamiento?, ¿o como procesamiento de forma casi neta? Explique con los ejemplos apropiados.

23.53 ¿Sería difícil usar los procesos de maquinado descritos en este capítulo sobre varios materiales suaves no metálicos o semejantes al caucho? Explique su reflexión y comente el rol de las propiedades físicas y mecánicas de dichos materiales con respecto a la operación de maquinado, además de cualesquiera dificultades que encuentre en la producción de las formas y exactitudes dimensionales deseadas.

23.54 Si un tornillo se rompe en un barreno, lo común es retirarlo taladrando primero un orificio en su eje y luego usando una herramienta especial para retirarlo. Inspeccione dicha herramienta y explique cómo funciona.

23.55 Una tendencia importante en las operaciones de maquinado es el uso cada vez mayor de dispositivos flexibles. Investigue en internet dichos dispositivos y comente su diseño y operación.

23.56 Revise la figura 23.8d y explique si sería posible maquinar ejes excéntricos como los que se muestran en la figura 23.13c, en la ilustración de la preparación. ¿Qué pasa si la parte es larga en comparación con su sección transversal? Explique.

23.57 Las barras de mandrinado se pueden diseñar con capacidades de sujeción internas para reducir o eliminar la vibración y el traqueteo durante el maquinado (vea la figura 23.18). En relación con la bibliografía técnica, describa los detalles de los diseños para dichas barras.

23.58 Se va a producir un perno largo a partir de una barra hexagonal extruida por medio de un proceso de torneado. Enuncie y explique las dificultades que se encontrarían en esta operación.

23.59 Haga una tabla de resumen de las capacidades de los procesos de maquinado descritos en este capítulo. Utilice columnas individuales para describir las herramientas involucradas, el tipo de herramientas de corte y los materiales de éstas, las formas y partes producidas, los tamaños máximo y mínimo comunes, el acabado de la superficie, las tolerancias dimensionales y tasas de producción.

Procesos de maquinado: fresado, brochado, aserrado, limado y manufactura de engranes

24.1	Introducción	668
24.2	Fresado y fresadoras	669
24.3	Cepillado	684
24.4	Brochado y brochadoras	684
24.5	Aserrado	688
24.6	Limado	692
24.7	Manufactura de engranes por medio de maquinado	692

EJEMPLOS:

24.1	Tasa de remoción de material, potencia, torque y tiempo de corte en el fresado de bloque	672
24.2	Tasa de remoción de material, potencia requerida y tiempo de corte en el fresado refrentado	676

CASOS DE ESTUDIO:

24.1	Brochado de estrías internas	687
24.2	Palos putt de golf	690

- Este capítulo comienza con el fresado, uno de los procesos más versátiles del maquinado, en el que un cortador giratorio retira material mientras se mueve a lo largo de una trayectoria determinada con respecto a la pieza de trabajo.
- Después se describen otros procesos de maquinado, como el cepillado y el brochado, en los cuales la herramienta de corte, o bien la pieza de trabajo, se mueven a lo largo de una trayectoria recta para producir superficies planas o de contorno.
- Posteriormente se estudian los procesos de aserrado, que por lo general se usan para preparar huecos para operaciones subsecuentes como formado, soldadura y maquinado. Se describe también con brevedad el limado, que se utiliza para retirar pequeñas cantidades de material comúnmente de los bordes y de las esquinas.
- El capítulo termina con descripciones de la manufactura de engranes por medio del maquinado, los cortadores especiales que se emplean, el equipo involucrado y la calidad y propiedades de los engranes producidos.

Partes comunes fabricadas: elementos con características externas e internas complejas, estriados y engranes.

Procesos alternativos: fundición en moldes por inyección, fundición de precisión, forjado de precisión, metalurgia de polvos, moldeo por inyección de polvo, rectificando con avance incremental, maquinado por descarga eléctrica, prototipos rápidos y fabricación.

24.1 Introducción

Además de producir partes con diversos perfiles externos o internos, como se describe en el capítulo 23, las operaciones de maquinado producen muchas otras formas complejas (figura 24.1). Aunque procesos tales como la fundición en moldes por inyección, forjado de precisión y metalurgia de polvos también pueden producir partes con tolerancias estrictas y buen acabado de la superficie, con frecuencia es necesario realizar operaciones complejas de maquinado con el fin de satisfacer los requerimientos y especificaciones de diseño.

En el capítulo anterior se describieron procesos de maquinado que producen formas redondas. Aunque los procesos y la maquinaria analizados en este capítulo también producen formas redondas y asimétricas, por lo general es aconsejable usar los procesos del capítulo 23 siempre que sea posible, ya que el equipo es más sencillo, menos caro y los procesos son más fáciles de ejecutar. Sin embargo eso no siempre puede hacerse, por lo que con frecuencia son esenciales las operaciones de maquinado descritas en este

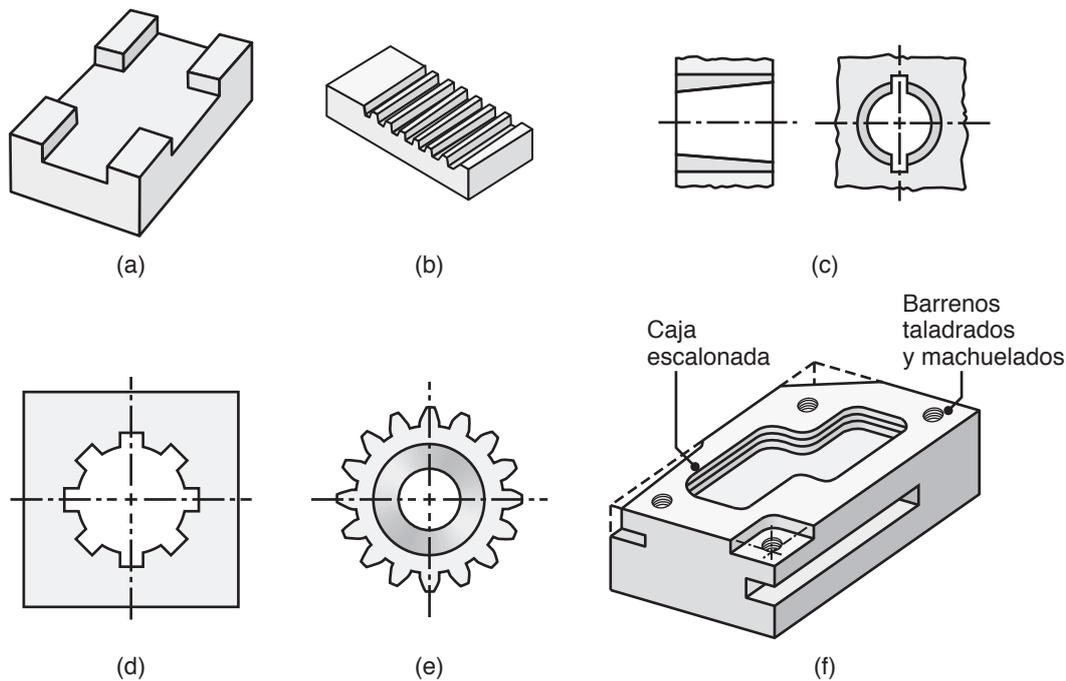


FIGURA 24.1 Partes y formas comunes que se pueden producir con los procesos de maquinado descritos en este capítulo.

capítulo. Aquí se describen varios procesos de corte y máquinas herramientas capaces de producir dichas formas con el empleo de herramientas cortadoras de un solo punto, de dientes múltiples y de forma (vea también la tabla 23.1).

24.2 Fresado y fresadoras

Con el término *fresado* se describen algunas operaciones altamente versátiles de maquinado en toda una variedad de configuraciones (figura 24.2) con el uso de una *fresa*, la cual es una herramienta cortadora de múltiples dientes que produce varias virutas en una revolución (figura 24.3).

24.2.1 Fresado periférico

En el *fresado periférico*, también llamado *fresado plano*, el eje de la rotación del cortador es paralelo a la superficie de la pieza de trabajo, como se aprecia en la figura 24.4. El cuerpo del cortador, que por lo general está hecho de acero de alta velocidad (sección 22.2), tiene múltiples dientes a lo largo de su circunferencia; cada diente actúa como una herramienta cortadora de un solo punto. Cuando el cortador es más largo que el ancho del corte, la operación se llama **fresado de bloque**.

Los cortadores para el fresado periférico pueden tener ya sea *dientes rectos* o *helicoidales*, lo que da como resultado una acción de corte ortogonal u oblicua, respectivamente (vea también la figura 21.9). Por lo general se prefieren los dientes helicoidales a los rectos, porque un diente siempre está en contacto parcial con la pieza de trabajo mientras gira el cortador. En consecuencia, la fuerza cortadora y el par en el cortador son menores, lo que da como resultado una operación de fresado más suave y con pocas virutas.

Fresado convencional y fresado concurrente. Observe en la figura 24.5a que la rotación del cortador puede ser en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj



Código QR 24.1 Fresado de caja. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

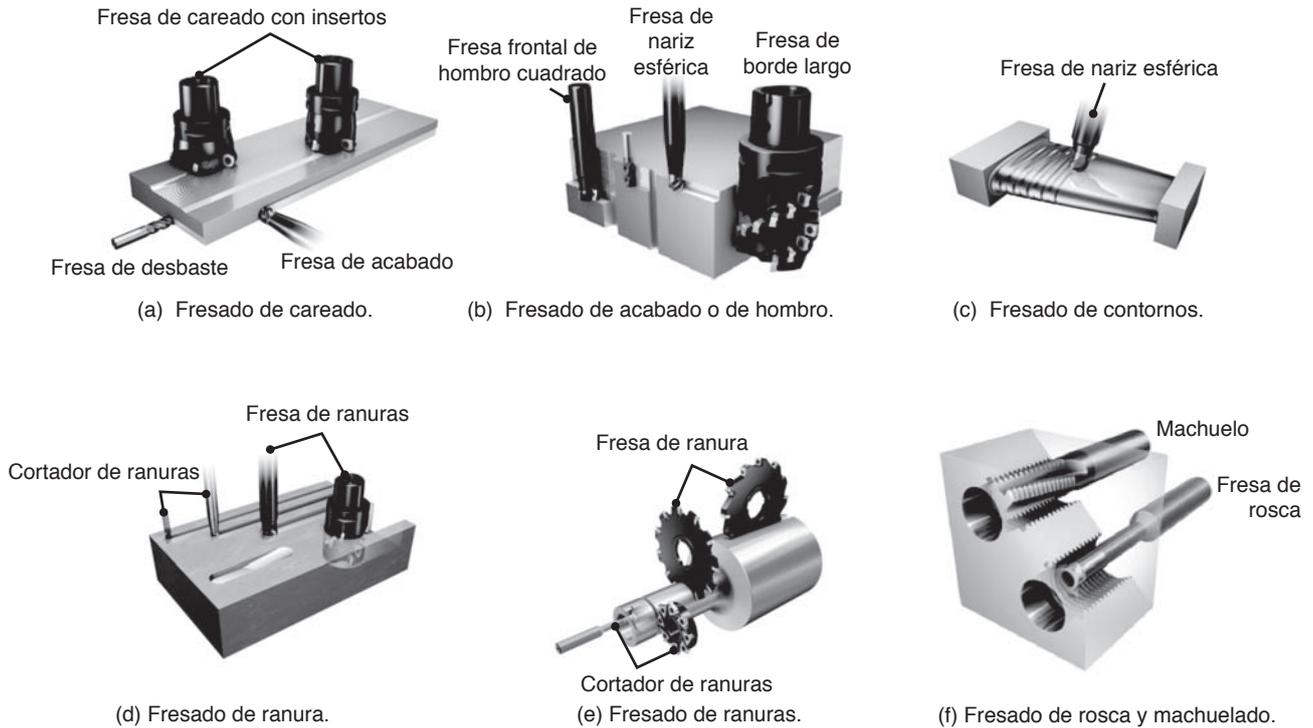


FIGURA 24.2 Algunos tipos básicos de fresas y operaciones de fresado. Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant.



FIGURA 24.3 Acción de corte de una fresadora que usa varios insertos para remover metal. Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant.

o en sentido contrario; esto es importante en la operación de fresado. En el *fresado convencional*, también llamado *fresado hacia arriba*, el máximo espesor de la viruta está al *final* del corte, a medida que el diente deja la superficie de la pieza de trabajo. En consecuencia, (a) el contacto del diente no es una función de las características de la superficie de la pieza de trabajo y (b) la contaminación o cascari-lla (capa de óxido) sobre la superficie no perjudica la vida de la herramienta. Éste es el método más común de fresado, donde la operación de corte es suave. Sin embargo, los dientes del cortador deben estar afilados, pues de otro modo harán fricción contra la superficie que se fresa y la embarrarán en algunos puntos antes de entrar en contacto y cortar. También puede haber cierta tendencia a que el cortador se mueva (sección 25.4) y la pieza de trabajo tienda a ser jalada hacia arriba (debido a la dirección de rotación del cortador), por lo que necesita estar debidamente sujeta a la mesa de la máquina.

En el *fresado concurrente*, conocido también como *fresado hacia abajo*, el corte comienza en la superficie de la pieza de trabajo, donde la viruta es más gruesa. La ventaja de este método es que la dirección de rotación del cortador empujará la pieza de trabajo *hacia abajo*, lo que la mantendrá en su lugar, un factor de particular importancia para las partes esbeltas. Sin embargo, debido a la fuerza de impacto resultante cuando un diente toca la pieza de trabajo, esta operación debe tener una sujeción rígida para el trabajo y debe eliminarse el juego en el engrane del mecanismo de avance de la mesa. El fresado en ascenso no es

adecuado para maquinarse piezas de trabajo con escamas en la superficie, por ejemplo en metales que hayan sido trabajados en caliente, forjados o fundidos. Las escamas son duras y abrasivas, por lo que provocan desgaste y daño excesivo en los dientes del cortador, lo que acorta la vida de la herramienta.

Parámetros del fresado. La velocidad de corte, V , en el fresado periférico es la velocidad superficial en el cortador, o

$$V = \pi DN, \quad (24.1)$$

donde D es el diámetro del cortador y N es la velocidad rotacional de éste (figura 24.5).

En la figura 24.3b, observe que el espesor de la viruta en el fresado periférico variará a lo largo de su longitud, debido al movimiento longitudinal relativo entre el cortador y la pieza de trabajo. Para un cortador de dientes rectos, el espesor aproximado *no deformado de la viruta* (también llamado *profundidad de corte de la viruta*), t_c , se puede calcular con la ecuación

$$t_c = 2f \sqrt{\frac{d}{D}}, \quad (24.2)$$

donde f es el avance por diente del cortador (la distancia que la pieza de trabajo recorre por diente del cortador, en mm/diente o pulg/diente), y d es la profundidad de corte. A medida que t_c se hace más grande, la fuerza en el diente del cortador aumentará.

El *avance por diente* está determinado por la ecuación

$$f = \frac{v}{Nn}, \quad (24.3)$$

donde v es la velocidad lineal (también llamada *velocidad de avance*) de la pieza de trabajo y n es el número de dientes en la periferia del cortador.

El tiempo de corte, t , está dado por la ecuación

$$t = \frac{l + l_c}{v}, \quad (24.4)$$

donde l es la longitud de la pieza de trabajo (figura 24.5c) y l_c es la longitud para alcanzar la profundidad completa de corte en el cortador con la pieza de trabajo. Con base en la suposición de que $l_c \ll l$ (aunque por lo general éste no es el caso), la *tasa de remoción de material* (MRR, por sus siglas en inglés) es

$$\text{MRR} = \frac{hwd}{t} = wdv, \quad (24.5)$$

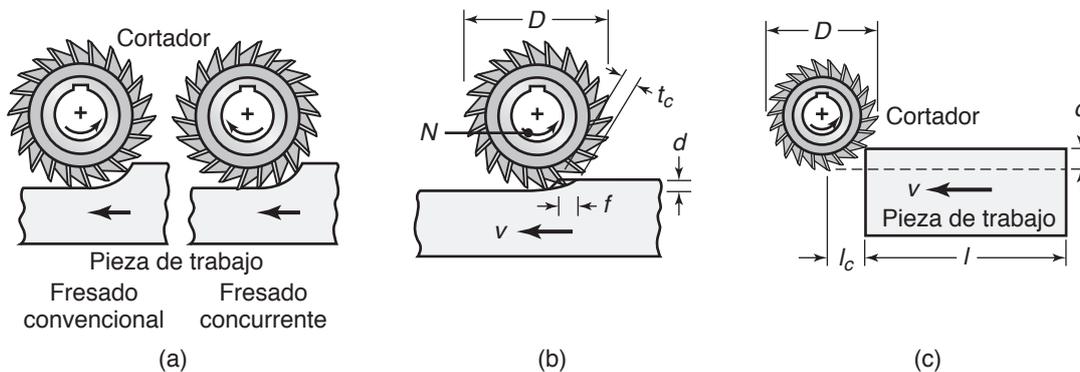


FIGURA 24.5 (a) Ilustración esquemática del fresado convencional y del fresado concurrente. (b) Operación de fresado periférico que muestra la profundidad de corte, d ; avance por diente, f ; profundidad de corte de la viruta, t_c , y velocidad de la pieza de trabajo, v . (c) Ilustración esquemática de la distancia que recorre el cortador, l_c , para alcanzar toda la profundidad de corte.

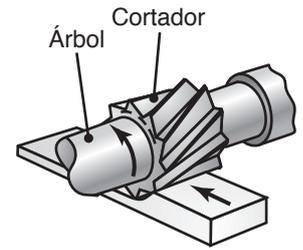


FIGURA 24.4 Ilustración esquemática del fresado periférico.

TABLA 24.1

Resumen de los parámetros y fórmulas del fresado periférico

N	= Velocidad rotacional de la fresa, rpm.
F	= Avance, mm/diente o pulg/diente.
D	= Diámetro del cortador, mm o pulg.
n	= Número de dientes en el cortador.
v	= Velocidad lineal de la pieza de trabajo o velocidad de avance, mm/min o pulg/min.
V	= Velocidad superficial del cortador, m/min o pies/min. = πDN .
f	= Avance por diente, mm/diente o pulg/diente. = v/Nn .
l	= Longitud de corte, mm o pulg.
t	= Tiempo de corte, s o min. = $(l + l_c)/v$, donde l_c = longitud para alcanzar la profundidad completa de corte en el cortador con la pieza de trabajo.
MRR	= mm^3/min o pulg^3/min . = $w dv$, donde w es el ancho del corte.
Torque	= N-m o lb-pies. = $F_t D/2$.
Potencia	= kW o hp. = $(\text{torque})(\omega)$, donde $\omega = 2\pi N$ rad/min.

donde w es el ancho del corte, el cual, en el fresado de bloque, es igual al ancho de la pieza de trabajo. La distancia que el cortador recorre en el *ciclo sin corte* de la operación de fresado es una consideración económica importante y debe minimizarse por medios tales como un recorrido más rápido de los componentes de la máquina herramienta. En la tabla 24.1 se resumen las ecuaciones anteriores y la terminología empleada.

El *requerimiento de potencia* en el fresado periférico se puede medir y también calcular, pero las *fuerzas* que actúan sobre el cortador (tangencial, radial y axial; vea la figura 23.5) son difíciles de calcular debido a las numerosas variables involucradas, muchas de las cuales se relacionan con la geometría del cortador. Estas fuerzas pueden medirse experimentalmente para varias condiciones de fresado, el *torque* sobre el husillo se puede calcular a partir de la potencia (vea el ejemplo 24.1). Aunque el par (torque) es el producto del radio del cortador y de la fuerza tangencial, la fuerza tangencial por diente dependerá de cuántos dientes estén en contacto en un momento dado durante el corte.

EJEMPLO 24.1 Tasa de remoción de material, potencia, torque y tiempo de corte en el fresado de bloque

Dado: Se va a efectuar una operación de fresado de bloque para un macizo de acero blando templado, de 12 pulgadas de largo y 4 pulgadas de ancho, con un avance $f = 0.01$ pulg/diente, y una profundidad de corte $d = \frac{1}{8}$ pulg. El cortador tiene un diámetro de $D = 2$ pulg, 20 dientes rectos y velocidad de $N = 100$ rpm. El cortador es más ancho que el bloque por maquinarse.

Se solicita: Calcular la tasa de remoción de material, estimar la potencia y el torque requerido para esta operación, así como su tiempo de corte.

Respuesta: A partir de la información dada, la velocidad lineal de la pieza de trabajo, v , se puede calcular con la ecuación (24.3):

$$v = fNn = (0.01)(100)(20) = 20 \text{ pulg/min.}$$

De la ecuación (24.5), la tasa de remoción de material se calcula como:

$$\text{MRR} = (4) \left(\frac{1}{8} \right) (20) = 10 \text{ pulg}^3/\text{min.}$$

Debido a que la pieza de trabajo es acero blando templado, la potencia unitaria se estima con la tabla 21.2, como 1.1 hp-min/pulg³. Así, la potencia requerida se calcula como

$$\text{Potencia} = (1.1)(10) = 11 \text{ hp.}$$

El torque que actúa en el husillo del cortador también se puede calcular si se observa que la potencia es el producto del torque y de la velocidad rotacional del husillo (en radianes por unidad de tiempo). Entonces,

$$\begin{aligned}\text{Torque} &= \frac{\text{Potencia}}{\text{Velocidad rotacional}} \\ &= \frac{(11 \text{ hp})(33\,000 \text{ lb-pies/min-hp})}{(100 \text{ rpm})(2\pi)} \\ &= 578 \text{ lb-pies.}\end{aligned}$$

El tiempo de corte está dado por la ecuación (24.4), de donde se puede obtener la cantidad l_c a partir de relaciones geométricas sencillas y para $D \gg d$, resulta ser aproximadamente igual a

$$l_c = \sqrt{Dd} = \sqrt{(2)\left(\frac{1}{8}\right)} = 0.5 \text{ pulg.}$$

Así, el tiempo de corte es

$$t = \frac{12 + 0.5}{20} = 0.625 \text{ min} = 37.5 \text{ seg.}$$

24.2.2 Fresado refrentado o careado

En el *fresado refrentado*, el cortador se monta en un husillo que tiene un eje de rotación perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo (figura 24.6b) y remueve material en la manera que se ilustra en la figura 24.6a. El cortador gira a una velocidad rotacional, N , y la pieza de trabajo se mueve a lo largo de una trayectoria rectilínea con una velocidad lineal v . Cuando la dirección de la rotación del cortador es la que se ilustra en la figura 24.6b, se trata de una operación de fresado concurrente; cuando es en dirección opuesta (figura 24.6c), se trata de fresado convencional. Los dientes cortadores, como los insertos de carbono, están montados en el cuerpo del cortador como se aprecia en la figura 24.7 (vea también la figura 22.3c).

Debido al movimiento relativo entre los dientes del cortador y la pieza de trabajo, el fresado refrentado deja *marcas de avance* en la superficie maquinada (figura 24.8), de manera parecida a las que dejan las operaciones de torneado, como se ilustra en la figura 21.2. Observe que la rugosidad de la superficie de la pieza de trabajo depende de la geometría de la esquina del inserto y del avance por diente.

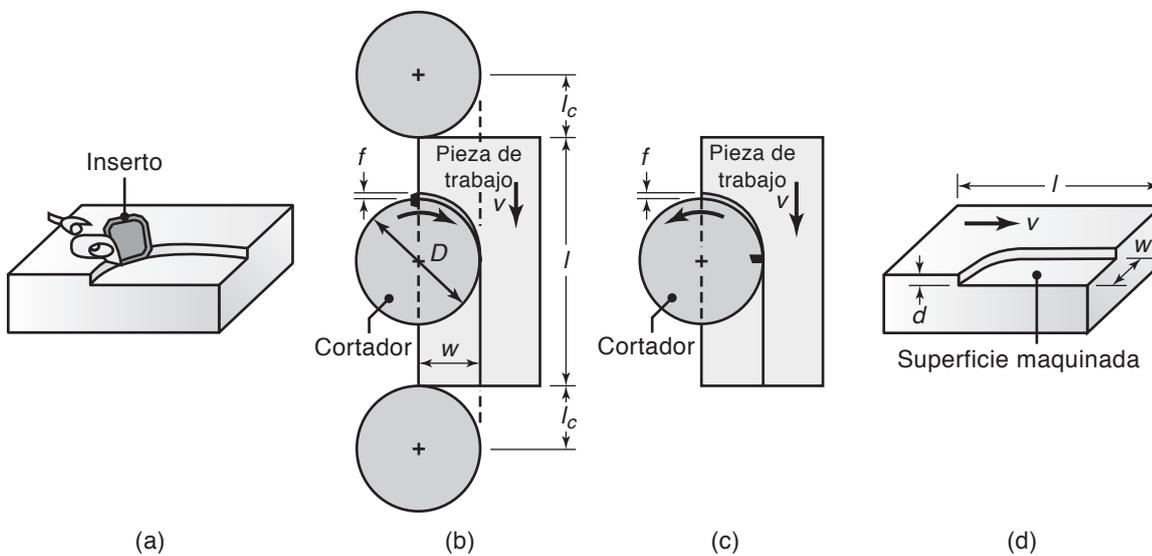


FIGURA 24.6 (a) Operación de fresado refrentado (con el cortador retirado) que muestra la acción de un solo inserto; (b) fresado concurrente; (c) fresado convencional y (d) dimensiones en el fresado refrentado. Observe que el ancho del corte, w , no es necesariamente el mismo que el radio del cortador.



FIGURA 24.7 Fresa de refrentado con insertos indexables. Fuente: Cortesía de Ingersoll Cutting Tool Company.

En la figura 24.9 se presenta la terminología para una fresa de refrentado, así como sus diferentes ángulos. Como puede verse del lado de la vista del inserto, en la figura 24.10, el *ángulo de avance* del inserto en el fresado refrentado tiene influencia directa en el *espesor no deformado de la viruta*, igual que en las operaciones de torneado (vea la figura 23.3). A medida que el ángulo de avance (positivo, como se aprecia en la figura 24.10b) aumenta, el espesor no deformado de la viruta disminuye (igual que el espesor de la viruta), y la longitud de contacto se incrementa, y por tanto también el ancho de la viruta. Sin embargo, observe que el área de la sección transversal de la viruta no deformada permanece constante. El *ángulo de avance* también influye en las fuerzas que se generan durante el fresado. Puede verse que a medida que dicho ángulo disminuye, hay una componente vertical más pequeña de la fuerza (es decir, la fuerza axial sobre el husillo del cortador). Para la mayoría de fresas de refrentado, lo común es que los ángulos de avance varíen de 0 a 45°.

Existe una amplia variedad de fresas e insertos disponibles (vea las figuras 24.2 y 24.11). El diámetro del cortador debe elegirse de modo que no interfiera con los accesorios, los dispositivos que sujetan la pieza de trabajo, ni otros componentes en el arreglo. En una operación normal de fresado refrentado, la razón del diámetro del cortador, D , al ancho del corte, w , no debe ser menor que 3:2.

Es importante la relación del diámetro del cortador con los ángulos del inserto y su posición relativa a la superficie por maquinado, porque determinará el ángulo con el que el inserto *entra y sale* de la pieza de trabajo. Note que en la figura 24.6b, para el fresado concurrente, si el inserto tiene ángulos de ataque axial y radial nulos (vea la figura 24.9), la cara de ataque del inserto hace contacto directamente con la pieza de trabajo. Sin embargo, como se vio en las figuras 24.11a y b, el mismo inserto puede tocar la pieza de trabajo en ángulos diferentes, lo que depende de las posiciones relativas del cortador y del ancho de la pieza de trabajo.

En la figura 24.11a, observe que el extremo del inserto hace el primer contacto por lo que hay una posibilidad de que el filo cortador se astille. Por otro lado, en la figura 24.11b, los primeros contactos (al entrar, reingresar, y las dos salidas) ocurren con un ángulo y fuera del extremo del inserto; en consecuencia, hay menos tendencia a que falle el inserto ya que las fuerzas sobre éste varían con más lentitud. En la figura 24.9, note que los ángulos de ataque radial y axial también tienen un efecto sobre dicha operación.

La figura 24.11c presenta los ángulos de salida para varias posiciones del cortador. Observe que en los primeros dos ejemplos el inserto sale de la pieza de trabajo con un ángulo, por lo que ocasiona que la fuerza sobre el inserto se reduzca a cero con una tasa más lenta (lo que es deseable para una vida más larga de la herramienta) que en el tercer ejemplo, donde el inserto sale de la pieza de trabajo en forma súbita (lo cual no es conveniente).

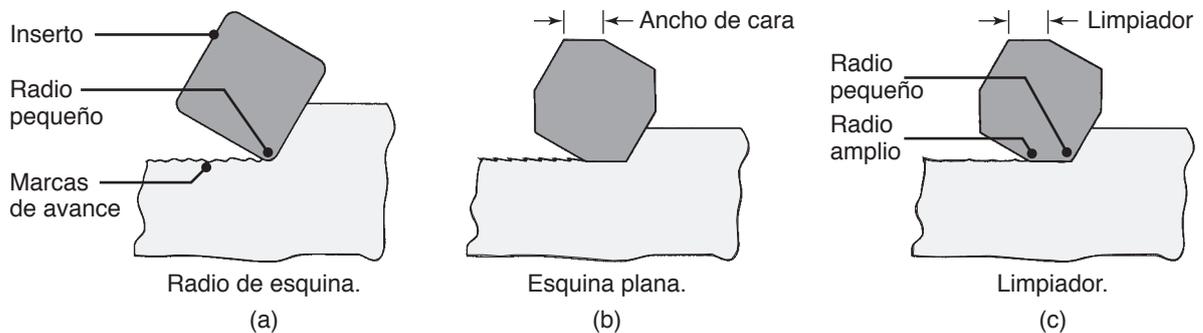


FIGURA 24.8 Ilustración esquemática del efecto de la forma del inserto sobre las marcas de avance sobre una superficie refrentada: (a) radio de esquina pequeño; (b) esquina plana sobre el inserto y (c) limpiador, que consiste en un radio pequeño seguido de otro más grande, lo que da como resultado marcas de avance más suaves. (d) Marcas de avance debidas a varias formas de inserto.

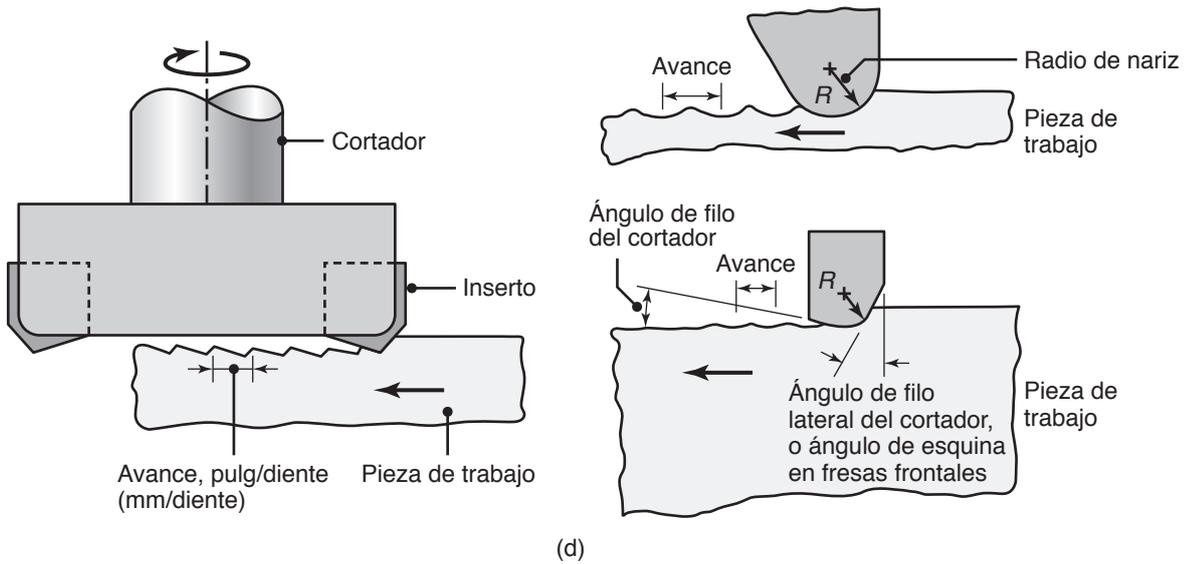


FIGURA 24.8 (continuación)

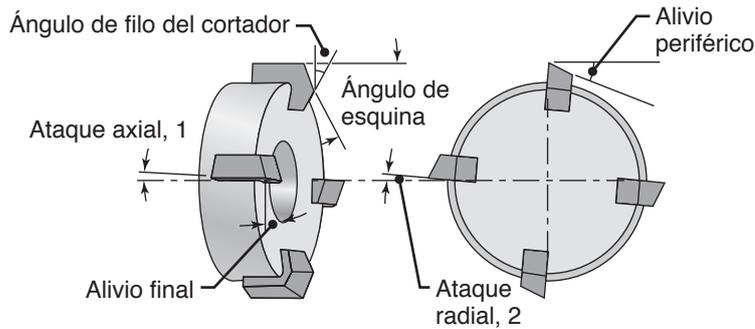


FIGURA 24.9 Terminología para una fresa de refrentado.

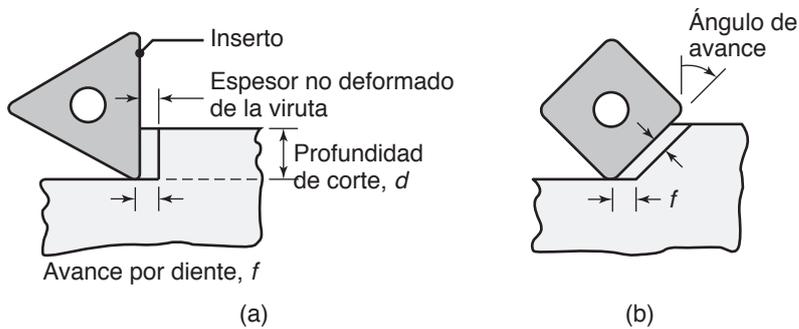


FIGURA 24.10 Efecto del ángulo de avance en el espesor no deformado de la viruta en el fresado refrentado. Observe que conforme el ángulo de avance se incrementa, el espesor de la viruta disminuye, pero la longitud del contacto (es decir, el ancho de la viruta) aumenta. Los filos del inserto deben ser lo suficientemente largos como para asimilar el incremento en la longitud del contacto.

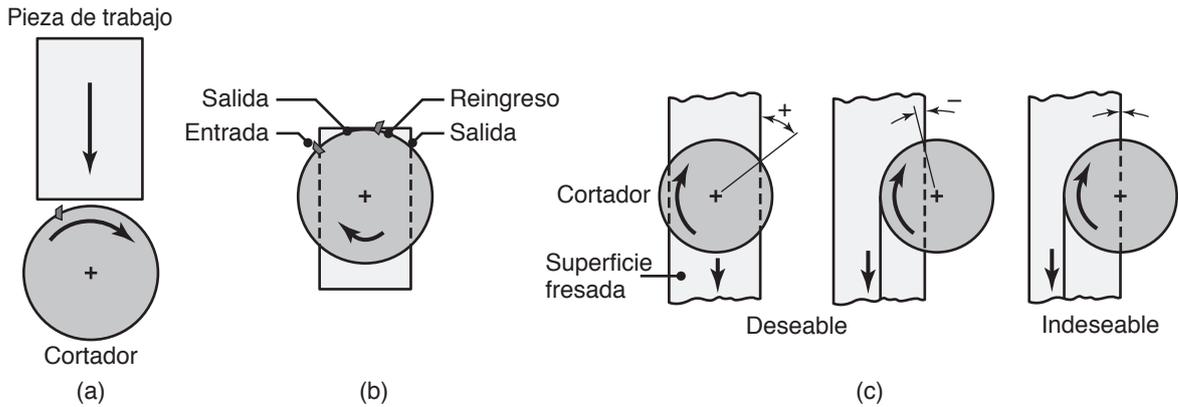


FIGURA 24.11 (a) Posición relativa del cortador y el inserto a medida que entran en contacto con la pieza de trabajo en el fresado refrentado. (b) Posiciones del inserto hacia el final del corte. (c) Ejemplos de ángulos de salida del inserto, donde se muestran posiciones deseables (ángulo positivo o negativo) e indeseables (ángulo de cero). En todas las figuras el husillo del cortador es perpendicular a la página.

EJEMPLO 24.2 Tasa de remoción de material, potencia requerida y tiempo de corte en el fresado refrentado

Dado: En relación con la figura 24.6, suponga que $D = 150$ mm, $w = 60$ mm, $l = 500$ mm, $d = 3$ mm, $v = 0.6$ m/min y $N = 100$ rpm. El cortador tiene 10 insertos y el material de la pieza de trabajo es una aleación de aluminio de alta resistencia.

Se solicita: Calcular la tasa de remoción de material, tiempo de corte y avance por diente, y estimar la potencia requerida.

Respuesta: En primer lugar, observe el lector que la sección transversal del corte es $wd = (60)(3) = 180$ mm². Entonces, si se observa que la velocidad de la pieza de trabajo, v , es de 0.6 m/min = 600 mm/min, la tasa de remoción de material (MRR) se calcula así:

$$MRR = (180)(600) = 108\,000 \text{ mm}^3/\text{min}.$$

El tiempo de corte está dado por

$$t = \frac{l + 2l_c}{v}.$$

De la figura 24.6, observe que para este problema, $l_c = \frac{D}{2} = 75$ mm. Por tanto, el tiempo de corte es

$$t = \frac{500 + 150}{10} = 65 \text{ s} = 1.08 \text{ min}.$$

El avance por diente se puede obtener de la ecuación (24.3), donde $N = 100$ rpm = 1.67 rev/s, por lo que

$$f = \frac{10}{(1.67)(10)} = 0.6 \text{ mm/diente}.$$

Para este material estimaremos la potencia unitaria, a partir de la tabla 21.2, como 1.1 Ws/mm³; por tanto la potencia es

$$\text{Potencia} = (1.1)(1800) = 1980 \text{ W} = 1.98 \text{ kW}.$$

24.2.3 Fresado frontal

El *fresado frontal* es una operación importante y común de maquinado debido a su versatilidad y capacidad para producir varios perfiles y superficies curvas. El cortador, llamado **fresa frontal** (figura 24.12), tiene ya sea un eje recto (para tamaños pequeños de cortador) o un eje con estrechamiento (para tamaños grandes) y está montado en el husillo de la

fresadora. Las fresas frontales están hechas de acero de alta velocidad, carburo sólido o insertos de carburo recubierto o sin recubrir, similares a los del fresado refrentado. El cortador por lo general rota sobre un eje perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo, pero también se puede inclinar para que se adapte a máquinas con ahusamiento o superficies curvadas.

Las fresas frontales están disponibles con puntas hemisféricas (*fresas de nariz de bola*; vea la figura 24.13) para la producción de superficies esculpidas, como las de dados y moldes; también se pueden producir con un radio específico, un extremo plano o un chaflán. Las *fresas de punta hueca* tienen dientes cortadores internos y se usan para maquinar las superficies cilíndricas de las piezas de trabajo con superficies sólidas y redondas. El fresado frontal produce una variedad de superficies de cualquier profundidad: curvas, escalonadas y en forma de caja (figura 24.2f). El cortador remueve material tanto con su extremo como con sus bordes cortadores cilíndricos.

Las fresadoras de husillo vertical u horizontal (vea la sección 24.2.8), así como los centros de maquinado (consulte la figura 25.7), pueden usarse para hacer fresado frontal a piezas de trabajo de varios tamaños y formas. Las máquinas se pueden programar de modo que el cortador siga un conjunto complejo de trayectorias con el fin de optimizar toda la operación de maquinado para obtener una mayor productividad a un costo mínimo.

Fresado frontal de alta velocidad. El *fresado frontal de alta velocidad* se ha convertido en un proceso importante con numerosas aplicaciones, como el fresado de grandes componentes aeroespaciales de aleaciones de aluminio y estructuras en forma de panel (vea también *maquinado de alta velocidad*, sección 25.5). Con velocidades del husillo de 20 000 a 80 000 rpm, las máquinas deben tener una rigidez alta, por lo general requieren de rodamientos hidrostáticos o de aire, así como de dispositivos de alta calidad para sujetar el trabajo. Los husillos tienen una exactitud rotacional de 10 μm ; por esto, las superficies de las piezas de trabajo producidas tienen una exactitud muy grande. A esas tasas tan altas de remoción de material, la generación y eliminación de virutas es un problema importante, como se vio en la sección 23.3.7.

La producción de cajas escalonadas en los dados de trabajo para metales (llamada *talla de dados*, como ocurre en la forja o formado de hojas metálicas) también se realiza con fresado frontal de alta velocidad, con frecuencia por medio de fresas de punta de nariz de bola recubiertas de TiAlN (figura 24.13). Las máquinas por lo general tienen capacidad de movimiento en *cuatro* o *cinco ejes* (vea por ejemplo la figura 24.21), pero los centros de maquinado (sección 25.2) pueden agregar más ejes para obtener geometrías más complejas. Dichas máquinas son capaces de alojar dados de dimensiones tan grandes como 3 m \times 6 m (9 pies \times 18 pies) que pesan 60 toneladas y cuestan más de \$2 millones de dólares. Entre las ventajas de las máquinas de cinco ejes están que (a) son capaces de maquinar formas muy complejas en una sola operación, (b) usan herramientas de corte más pequeñas, lo que reduce la tendencia a la vibración y el traqueteo, y (c) permiten la perforación de barrenos a diferentes ángulos compuestos.

24.2.4 Otras operaciones de fresado y otras fresas

Para maquinar piezas de trabajo se emplean muchas más operaciones de fresado y fresas. En el **fresado compuesto (gemelo)**, se montan en un soporte dos o más cortadores y se usan para maquinar simultáneamente dos superficies paralelas (figura 24.14a). El **fresado**



FIGURA 24.12 Selección de fresas frontales; el número de dientes y el ángulo de la hélice se seleccionan con base en si se hará un corte de desbaste o de acabado. Fuente: Cortesía de Kennametal Inc.



FIGURA 24.13 Fresas con punta de nariz de bola; estos cortadores producen contornos elaborados y es frecuente que se utilicen en el maquinado de dados y moldes (vea también la figura 24.2d). Fuente: Cortesía de Dijet, Inc.



Código QR 24.2 Fresado con fresas de punta de nariz de bola. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

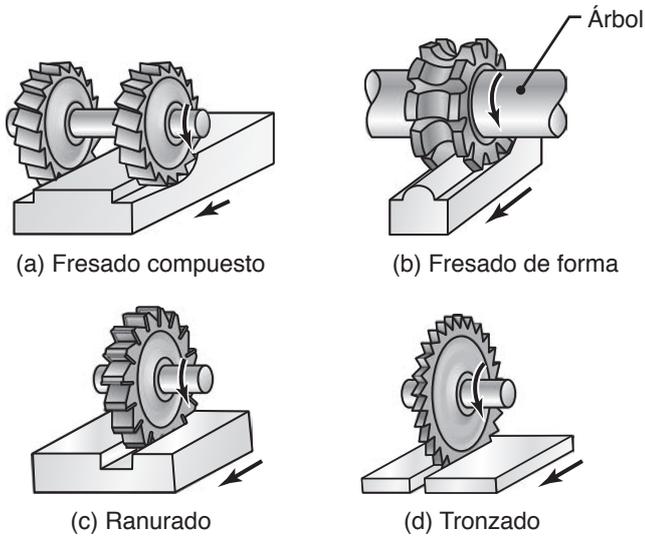


FIGURA 24.14 Cortadores para (a) fresado compuesto; (b) fresado de forma; (c) ranurado y (d) tronzado con fresa.

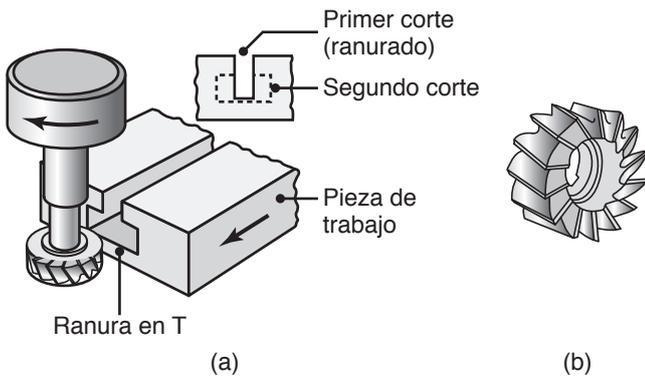


FIGURA 24.15 (a) Corte de ranura en T, con una fresa. (b) Fresa de concha.

de forma produce perfiles curvos por medio de cortadores que tienen dientes de forma especial (figura 24.14b); dichos cortadores también se utilizan para cortar dientes de engranes, como se describe en la sección 24.7.

Las operaciones de ranurado y tronzado se realizan con *cortadores circulares*, como se aprecia en las figuras 24.14c y d, respectivamente. Los dientes pueden estar espaciados ligeramente, como los de una sierra (sección 24.5), con el fin de dejar un claro para el ancho del cortador cuando se maquinan ranuras profundas. Las sierras de tronzado son relativamente delgadas, por lo general de menos de 5 mm (3/16 pulg). Los *cortadores de ranura en T* se utilizan para fresar ranuras en forma de T, como las que se encuentran en las mesas de trabajo de las máquinas herramienta para sujetar las piezas de trabajo. Como se aprecia en la figura 24.15a, primero se fresa una ranura con una fresa frontal y después el cortador maquina el perfil completo de la ranura en T, en un paso.

Los *cortadores de cuñeros* o *de chaveteros* se usan para hacer cuñeros redondos o *Woodruff (media luna)* para flechas. Las *fresas en ángulo*, ya sean de ángulo doble o sencillo, se emplean para producir superficies ahusadas con varios ángulos. Las *fresas de concha* (figura 24.15b) son huecas y están montadas en un zanco, lo que permite que se use éste para cortadores de diferente tamaño. El uso de fresas de concha es parecido al de las fresas frontales.

El fresado con un solo diente cortador, montado en un husillo de alta velocidad, se conoce como *corte al vuelo* y, por lo general, se utiliza en operaciones sencillas de fresado frontal y abocardado. Esta herramienta puede tener la forma de cortador de un solo punto y colocarse en varias posiciones radiales en el husillo, en un arreglo semejante al que se ilustra en la figura 23.24b.

24.2.5 Portaherramientas

La rigidez del portaherramientas y de los cortadores es importante para la calidad de la superficie y para reducir la vibración y el traqueteo durante las operaciones de

fresado. Las fresas se clasifican ya sea como cortadores de árbol o cortadores de zanco. Los *cortadores de árbol* se montan en un *eje* o *árbol* (vea las figuras 24.14 y 24.18a) para operaciones como fresado periférico, frontal, compuesto y de formado. En los *cortadores de zanco*, el cortador y el eje están hechos de una sola pieza y los ejemplos más comunes son las fresas frontales. Las fresas frontales pequeñas tienen ejes rectos, pero algunas de mayor tamaño los tienen con ahusamiento para lograr un mejor montaje en el husillo de la máquina con el fin de resistir las grandes fuerzas y pares generados durante el corte. Los cortadores con ejes rectos se montan en portaherramientas para fresas frontales; los de ejes con ahusamiento se montan en portaherramientas cónicas. También se dispone de portaherramientas y árboles hidráulicos.

24.2.6 Capacidades en el proceso de fresado

Además de las diferentes características de los procesos de fresado descritos hasta este momento, las capacidades en el proceso de fresado incluyen parámetros como el acabado de la superficie, tolerancias dimensionales, tasa de producción y consideraciones de costo.

Los datos sobre las capacidades del proceso se presentan en las tablas 23.1 y 23.8, en las figuras 23.13 y 23.14 y en el capítulo 40.

Los rangos convencionales de avance y de velocidades de corte para el fresado se dan en la tabla 24.2 a manera de lineamientos generales. En función del material de la pieza de trabajo y su condición, el material de la herramienta de corte y los parámetros del proceso, las velocidades de corte varían mucho en el rango de 30 a 3000 m/min (90 a 10 000 pies/min). Es común que el avance por diente varíe de alrededor de 0.1 mm (0.004 pulg) a 0.5 mm (0.02 pulg) y, por lo general, las profundidades de corte son de 1 a 8 mm (0.004 a 0.30 pulg). Consulte la tabla 23.6 para recomendaciones sobre fluidos cortadores.

En la tabla 24.3 se da una **guía de solución de problemas** general para las operaciones de fresado; los últimos cuatro conceptos se ilustran en las figuras 24.16 y 24.17. El *retroceso* involucra marcas de doble avance, hechas por el borde posterior del cortador. Observe en la tabla 24.3 que algunas recomendaciones (como el cambio de los parámetros del fresado o de las herramientas de corte) son más fáciles de seguir que otras (por ejemplo el cambio de los ángulos de la herramienta, de la geometría del cortador, así como de la rigidez de los husillos y los dispositivos sujetadores del trabajo).

TABLA 24.2

		Condiciones de inicio de propósito general		Rango de condiciones	
		Avance, mm/diente (pulg/diente)	Velocidad, m/min (pies/min)	Avance, mm/diente (pulg/diente)	Velocidad, m/min (pies/min)
Material	Herramienta de corte				
Aceros al bajo carbono y maquinado libre	Carburo sin recubrir,	0.13-0.20	100-472	0.085-0.38	90-425
	carburo recubierto, cermets.	(0.005-0.008)	(320-1550)	(0.003-0.015)	(300-1400)
Aleaciones de aceros Blandos	Cermets no recubiertos y recubiertos.	0.10-0.18	100-260	0.08-0.30	60-370
		(0.004-0.007)	(360-860)	(0.003-0.012)	(200-1200)
Duros	Cermets, PBNc.	0.10-0.15	90-220	0.08-0.25	75-460
		(0.004-0.006)	(310-720)	(0.003-0.010)	(250-1500)
Hierro fundido, gris Blando	Cermets no recubiertos, recubiertos, SiN.	0.10-0.20	160-440	0.08-0.38	90-1370
		(0.004-0.008)	(530-1440)	(0.003-0.015)	(300-4500)
Duros	Cermets, SiN, PBNc.	0.10-0.20	120-300	0.08-0.38	90-460
		(0.004-0.008)	(400-960)	(0.003-0.015)	(300-1500)
Acero inoxidable Austenítico	Cermets no recubiertos y recubiertos.	0.13-0.18	120-370	0.08-0.38	90-500
		(0.005-0.007)	(370-680)	(0.003-0.015)	(300-1800)
Aleaciones de alta temperatura Basadas en níquel	Cermets no recubiertos, recubiertos, SiN, PBNc.	0.10-0.18	30-370	0.08-0.38	30-550
		(0.004-0.007)	(100-1200)	(0.003-0.015)	(90-1800)
Aleaciones de titanio	Cermets no recubiertos, recubiertos.	0.13-0.15	50-60	0.08-0.38	40-140
		(0.005-0.006)	(175-200)	(0.003-0.015)	(125-450)
Aleaciones de aluminio Maquinado libre	PCD no recubierto, recubierto.	0.13-0.23	1200-1460	0.08-0.46	300-3000
		(0.005-0.009)	(3920-4790)	(0.003-0.018)	(1000-10 000)
Alto silicio	PCD	0.13	610	0.08-0.38	370-910
		(0.005)	(2000)	(0.003-0.015)	(1200-3000)
Aleaciones de cobre	PCD no recubierto, recubierto. PCD	0.13-0.23	300-760	0.08-0.46	90-1070
		(0.005-0.009)	(1000-2500)	(0.003-0.018)	(300-3500)
Plásticos	PCD no recubierto, recubierto. PCD	0.13-0.23	270-460	0.08-0.46	90-1370
		(0.005-0.009)	(900-1500)	(0.003-0.018)	(300-4500)

Fuente: Basado en datos de Kennametal, Inc.

Nota: Las profundidades de corte, d , por lo general están en el rango de 1 a 8 mm (0.04 a 0.3 pulg). PBNc: nitruro de boro cúbico policristalino; PCD: diamante policristalino. Vea también en la tabla 23.4 el rango de las velocidades de corte dentro de los grupos de materiales para la herramienta.

TABLA 24.3

Guía general de solución de problemas en las operaciones de fresado	
Problema	Causas probables
Rotura de la herramienta	Al material de la herramienta le falta resistencia, ángulos impropios de la herramienta, parámetros de maquinado demasiado altos.
Desgaste excesivo de la herramienta	Parámetros de maquinado demasiado altos, material de la herramienta inadecuado, ángulos de la herramienta impropios, fluido de corte inadecuado.
Acabado rugoso de la superficie	Avance por diente demasiado alto, muy pocos dientes en el cortador, la herramienta está astillada o desgastada, filo en el cortador, vibración y traqueteo.
Tolerancias muy amplias	Falta de rigidez del husillo y el dispositivo sujetador del trabajo, aumento excesivo de la temperatura, herramienta sin filo, las virutas bloquean el cortador.
Superficie de la pieza de trabajo quemada	Herramienta sin filo, profundidad de corte demasiado baja, ángulo de alivio radial muy pequeño.
Retroceso	Herramientas de corte sin filo, inclinación del husillo del cortador, ángulos de la herramienta negativos.
Marcas de traqueteo	Rigidez insuficiente del sistema; vibraciones externas; avance, profundidad y ancho de corte demasiado grandes.
Formación de rebabas	Bordes cortadores sin filo o demasiado asentados, ángulo de entrada o salida incorrecto, avance y profundidad de corte muy altos, forma del inserto incorrecta.
Rotura	Ángulo de avance muy bajo, geometría incorrecta del borde cortador, ángulo incorrecto de entrada o salida, avance y profundidad de corte demasiado grandes.

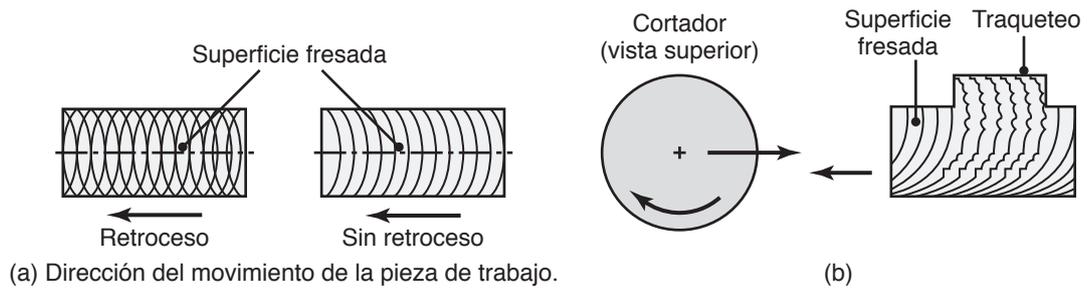


FIGURA 24.16 Características superficiales de la pieza de trabajo en el fresado refrentado (vea también la figura 24.8).

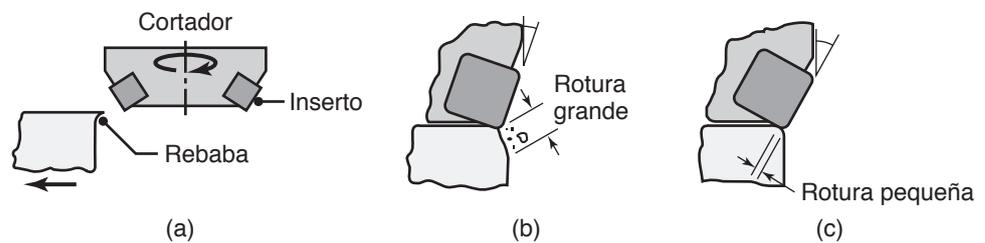


FIGURA 24.17 Defectos del borde en el fresado refrentado: (a) formación de rebabas a lo largo del borde de la pieza de trabajo; (b) rotura a lo largo del borde de la pieza de trabajo, y (c) cómo puede evitarse al aumentar el ángulo de avance (vea también el último renglón de la tabla 24.3).

24.2.7 Lineamientos de diseño y operación para el fresado

Por lo general los lineamientos para el torneado y el mandrinado, dados en las secciones 23.3.6 y 23.4, también son aplicables a las operaciones de fresado. Entre los factores adicionales relevantes en las operaciones de fresado están los siguientes:

- Las fresas estándar deben usarse tanto como sea posible, en función de las características de diseño de la parte; deben evitarse los cortadores especiales caros.
- De preferencia se deben especificar chaflanes, en lugar de radios, ya que es difícil hacer coincidir con suavidad varias superficies que se intersecan si se especifican radios.
- Deben evitarse cajas escalonadas y cajas internas con esquinas agudas, por la dificultad de fresarlas, pues los dientes o insertos cortadores tienen un radio de borde finito. Cuando sea posible, el radio de la esquina debe coincidir con la geometría de la fresa.
- Aunque pueden usarse pequeñas fresas para fresar cualquier superficie, son menos robustas y más susceptibles a astillarse y a romperse que los cortadores grandes.
- Las piezas de trabajo deben ser lo bastante rígidas como para minimizar las deflexiones que podrían resultar de la sujeción y las fuerzas de corte.
- Las piezas de trabajo deben diseñarse de modo que puedan sujetarse o fijarse en accesorios durante el maquinado. Además, los accesorios deben diseñarse para minimizar las veces que sea necesario reposicionar la parte para terminar la operación de fresado.

Los lineamientos para evitar la vibración y el traqueteo al fresar son similares a los del torneado; además deben considerarse las siguientes prácticas:

- Los cortadores deben montarse lo más cerca posible del husillo, para reducir las deflexiones de la herramienta.
- Los dispositivos y accesorios de sujeción de la herramienta deben ser lo más rígidos posible.
- En los casos en que haya vibración y traqueteo, deben modificarse la forma de la herramienta y las condiciones del proceso, incluso el uso de cortadores con menos dientes o, siempre que sea posible, con espaciado aleatorio de los dientes (vea la sección 25.4).

24.2.8 Fresadoras

Debido a que son capaces de realizar una amplia variedad de operaciones de corte, las fresadoras están entre las más versátiles y útiles de todas las máquinas herramienta. E. Whitney (1765-1825) construyó la primera fresadora en 1820. Ahora existe una gran selección de fresadoras con numerosas características, la más común de las cuales se describe a continuación. Estas máquinas están siendo sustituidas ahora con rapidez por máquinas de *control numérico computarizado* (CNC) y por *centros de maquinado*; aunque no son caras, las máquinas controladas manualmente todavía se usan mucho, en especial para corridas pequeñas de producción o para fabricar prototipos. Las máquinas modernas son muy versátiles y tienen la capacidad de fresar, taladrar, mandrinar y machuelar con gran exactitud repetida (figura 24.20).

Máquinas de tipo columna y rodilla. Las *máquinas de tipo columna y rodilla* son el tipo más común. El husillo en que se monta la fresa puede ser *horizontal* (figura 24.18a) para el fresado periférico, o *vertical* para operaciones de fresado refrentado y frontal, mandrinado y taladrado (figura 24.18b). Los componentes básicos de estas máquinas son las siguientes:

- *Mesa de trabajo*: en la que la pieza se sujeta con mordazas mediante ranuras en T; la mesa se mueve en forma longitudinal en relación con la silla o carro.
- *Silla o carro*: da apoyo a la mesa y puede moverse en dirección transversal.
- *Rodilla*: da apoyo a la silla y da movimiento vertical a la mesa, de modo que la profundidad de corte puede ajustarse y se pueden alojar las piezas de trabajo con varias alturas.



Código QR 24.3 Fresado de álabes de turbina. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

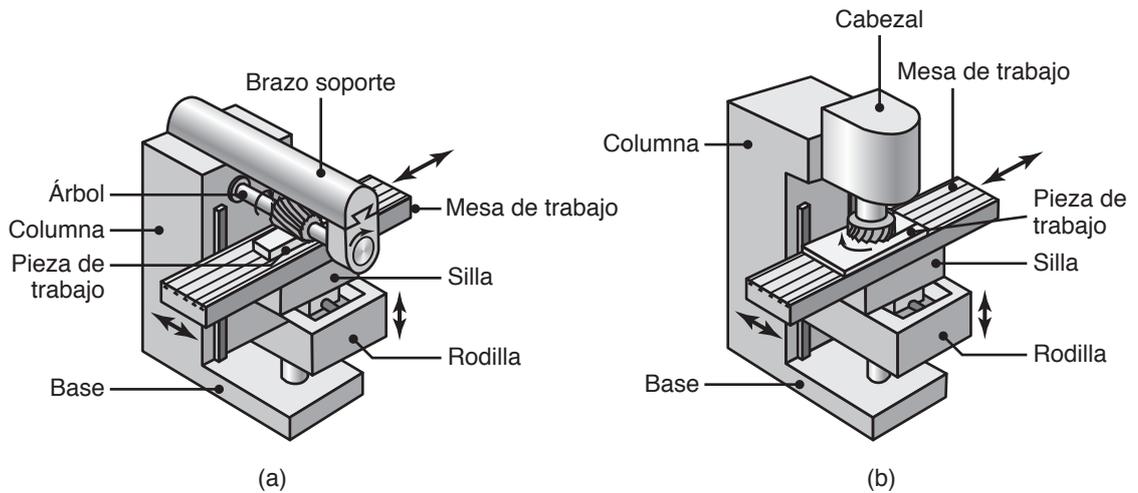


FIGURA 24.18 Ilustración esquemática de (a) fresadora tipo columna y rodilla de husillo horizontal y (b) fresadora tipo columna y rodilla de husillo vertical. Fuente: Tomado de G. Boothroyd.

- *Brazo soporte*: se usa en máquinas horizontales; es ajustable para que pueda albergar árboles de diferente longitud.
- *Cabezal*: contiene al husillo y al portaherramientas; en máquinas verticales el cabezal puede ser fijo o ajustable verticalmente y se puede girar en el plano vertical sobre la columna para cortar superficies estrechas.

Las **fresadoras planas** tienen por lo menos tres ejes de movimiento, que se realiza en forma manual ya sea con un actuador de tornillo de potencia o con la activación de actuadores de potencia que activan el motor. En las **fresadoras de columna y rodilla** universales, la mesa puede girar en un plano horizontal; de esta manera se pueden maquinar formas complejas, como muescas helicoidales en diferentes ángulos, para producir partes como engranes, barrenos, roscas y cortadores.

Fresadoras longitudinales (de bancada). En las *máquinas de bancada* la mesa de trabajo está montada directamente sobre la bancada, que reemplaza a la rodilla y sólo se mueve en forma longitudinal (figura 24.19). Aunque no son tan versátiles como otros tipos, estas máquinas tienen mucha rigidez y normalmente se usan para hacer trabajos de producción elevada. Los husillos pueden ser horizontales o verticales y de tipo doble o triple (con dos o tres husillos, respectivamente), para maquinar simultáneamente dos o tres superficies de trabajo.

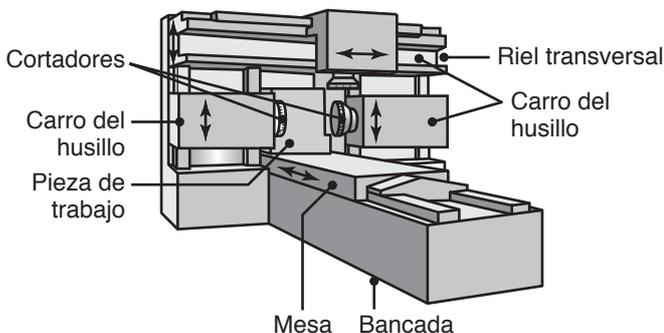


FIGURA 24.19 Ilustración esquemática de una fresadora longitudinal o de tipo bancada.

Otros tipos de fresadoras. Hay otros tipos disponibles de fresadoras (vea también *centros de maquinado*, sección 25.2). Las **fresadoras tipo cepillo**, que son similares a las de tipo bancada, están equipadas con varios cabezales y cortadores para fresar distintas superficies. Es normal que se usen para hacer piezas de trabajo pesadas y son más eficientes que los cepillos normales (sección 24.3) cuando se usan para propósitos similares. Las **máquinas de mesa rotatoria** son parecidas a las fresadoras verticales y están equipadas con uno o más cabezales para operaciones de fresado refrentado. También están las **fresadoras de contornos**, que tienen cinco

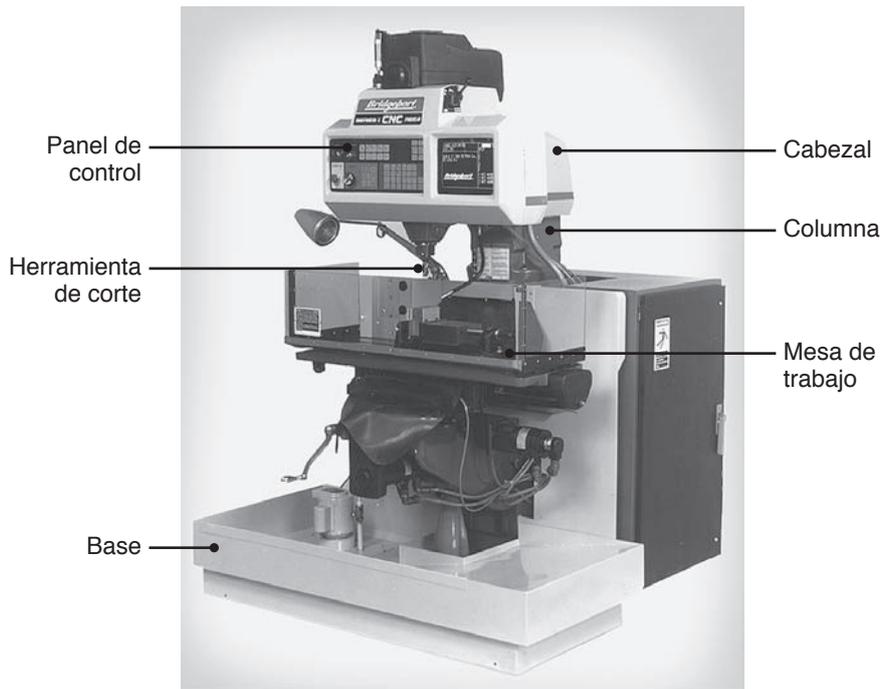


FIGURA 24.20 Fresadora de husillo vertical de control numérico computarizado (CNC); ésta es una de las máquinas herramienta más versátiles. La fresadora de husillo vertical original, usada en los talleres, aún se conoce como “Bridgeport” debido a que el fabricante tenía su sede en Bridgeport, Connecticut. *Fuente:* Cortesía de Bridgeport Machines Division, Textron, Inc.

ejes de movimiento (figura 24.21); nótese los tres movimientos lineales y dos movimientos angulares de los componentes de la máquina.

Dispositivos y accesorios para sujetar el trabajo. La pieza de trabajo a fresar debe sujetarse de manera segura a la mesa de trabajo para que resista las fuerzas de corte y se impida que se deslice durante el fresado. Con este fin se utilizan diferentes soportes fijos y prensas (vea también la sección 37.8 acerca de *soportes flexibles*). Las prensas se usan para trabajos de producción pequeña de partes chicas, se montan y sujetan a la mesa de trabajo por medio de ranuras T como las que se ilustran en las figuras 24.18a y b, mientras que los soportes *fijos* se emplean para trabajos de mucha producción y se pueden automatizar con diferentes medios mecánicos e hidráulicos.

Los *accesorios* para fresadoras incluyen diferentes elementos y arreglos fijos para el cabezal de la máquina, así como para la mesa de trabajo, que están diseñados para adaptarse a diferentes operaciones de fresado. El accesorio que se usa más comúnmente, por lo general en talleres, es el *cabezal divisor universal (indexador)*. De operación manual, este elemento rota (*indexa*) la pieza de trabajo a ángulos específicos entre pasos individuales de maquinado. Se ha usado normalmente para fresar partes con superficies poligonales y para maquinar dientes de engranes.

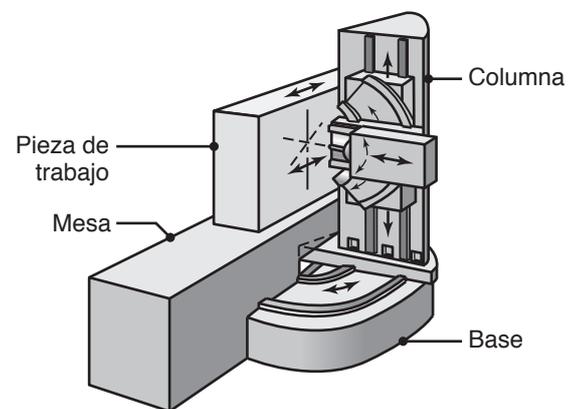


FIGURA 24.21 Ilustración esquemática de una fresadora de contornos de cinco ejes; observe que hay tres movimientos lineales principales y dos angulares para los componentes de la máquina.

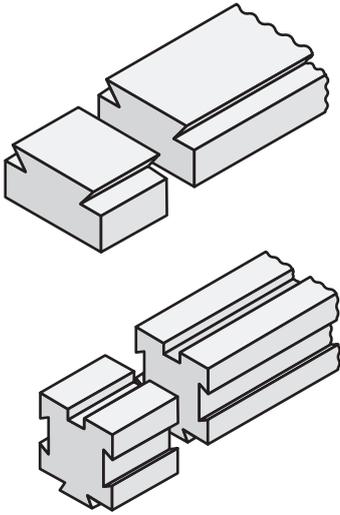


FIGURA 24.22 Partes comunes que se pueden maquina en un cepillo.

24.3 Cepillado

Cepillado de mesa. Ésta es una operación de maquinado relativamente sencilla por medio de la cual se producen superficies, así como secciones transversales con ranuras y escalones, a lo largo de la pieza de trabajo (figura 24.22). El formado se hace por lo general en piezas de trabajo grandes, de hasta 25 m × 15 m (75 pies × 40 pies), aunque la longitud de 10 m es más normal. En un **cepillo**, también llamado *garlopa*, cuando se maquina una capa de un lingote fundido la pieza de trabajo se monta en una mesa que se mueve hacia atrás y adelante a lo largo de una trayectoria recta. Un *riel transversal* horizontal, que se mueve en forma vertical a lo largo de las vías de la columna, está equipado con una o más cabezas de herramienta. Los cortadores están montados en las cabezas y el maquinado se realiza siguiendo una trayectoria recta. Con el fin de impedir que los bordes cortantes se astillen cuando se frota sobre la pieza de trabajo durante el paso de regreso, las herramientas se inclinan o bien se levantan en forma mecánica o hidráulica.

Debido al movimiento recíproco de la pieza de trabajo, el tiempo transcurrido sin cortar durante la etapa de regreso es significativo. En consecuencia estas operaciones no son eficientes ni económicas, excepto para una producción de baja cantidad que por lo general es el caso de las piezas de trabajo grandes y largas. La eficiencia de la operación mejora si se equipan los cepillos con sujetadores y herramientas que corten en ambas direcciones del recorrido de la mesa. Asimismo, debido a la longitud de la pieza de trabajo, es esencial equipar las herramientas de corte con rompevirutas; de lo contrario éstas serán muy largas e interferirán con la operación de la máquina, además de llegar a ser un peligro para la seguridad.

Cepillado de codo. En este cepillado, lo que se mueve es la herramienta, no la pieza de trabajo, y las piezas de trabajo son más pequeñas, por lo general menores de 1 m × 2 m (3 pies × 6 pies) de área. En un **cepillo de codo horizontal**, la herramienta cortadora se mueve hacia atrás y adelante en una trayectoria recta. La herramienta se sujeta a la torre de herramientas, que está montada en el ariete; éste tiene un movimiento recíproco. En la mayoría de las máquinas el corte se realiza durante el movimiento hacia adelante del ariete (*corte de empuje*); en otras, se efectúa durante la etapa de regreso (*corte a la inversa*). Los **cepillos de codo verticales** (llamadas **ranuradoras**) se utilizan para maquina ranuras, cuñeros y dados. Debido a las bajas tasas de producción, actualmente sólo se usan por lo común cepillos de codo para propósito especial (como formadoras de engranes, sección 24.7.2).

24.4 Brochado y brochadoras

El *brochado* es similar al cepillado con un cortador largo de dientes múltiples y se utiliza para maquina superficies internas y externas, como orificios de sección circular, cuadrada o irregular; cuñeros; dientes de engranes internos; estriados internos y superficies planas (figura 24.23). En un **brochado normal** (figura 24.24a), la profundidad normal del material removido en una etapa es la suma de las profundidades de corte de cada diente de la brocha. Un brochado grande remueve material a profundidades de hasta 38 mm (1.5 pulg) en un solo paso. El brochado es un proceso importante de producción y manufactura, partes con buen acabado superficial y buena exactitud dimensional. Compite favorablemente con otros procesos de maquinado como el mandrinado, fresado, cepillado y rimado para producir formas similares. Aunque los brochados pueden ser caros, el costo se justifica con corridas de producción en grandes cantidades.

Brochas. En la figura 24.24b se presenta la terminología de una brocha convencional. El *ángulo de ataque* depende del corte del material (como en el torneado y otras operaciones de corte) y por lo general varía de 0 a 20°. Es común que el *ángulo de holgura* sea de 1 a 4°; los dientes de acabado tienen ángulos menores; un ángulo de holgura demasiado pequeño ocasiona fricción de los dientes contra la superficie brochada. El *paso* de los

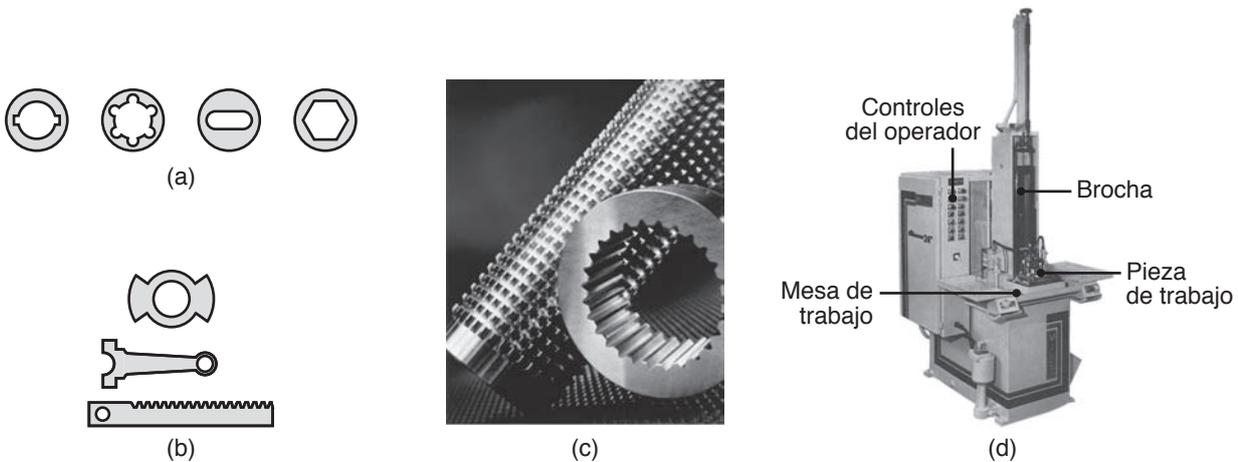


FIGURA 24.23 (a) Partes comunes hechas con brochado interno. (b) Partes manufacturadas por brochado superficial. (c) Brocha estriadora y estriado interno usado para acoplar flechas. (d) Brochadora vertical. Fuente: (a) y (b) Cortesía de General Broach Company, (c) cortesía de The Broachmasters, Inc., y (d) cortesía de Ty Miles, Inc.

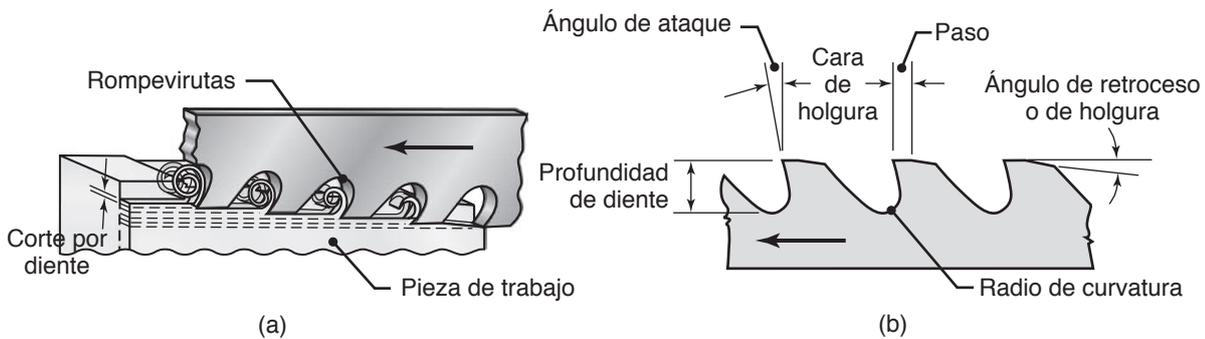


FIGURA 24.24 (a) Acción de corte de una brocha, con sus distintas características. (b) Terminología de una brocha.

dientes depende de factores como la longitud de la pieza de trabajo (longitud del corte), resistencia de los dientes y tamaño y forma de las virutas.

La profundidad y el paso del diente deben ser lo suficientemente grandes como para alojar las virutas que se producen durante el brochado, en particular para piezas de trabajo largas. En todo momento debe haber al menos dos dientes en contacto con la pieza de trabajo. Puede usarse la fórmula siguiente para obtener el paso de una brocha para cortar una superficie de longitud l :

$$\text{Paso} = k \sqrt{l}, \quad (24.6)$$

donde k es una constante, igual a 1.76 cuando l se expresa en mm y 0.35 si l está en pulgadas. Un paso promedio para brochas pequeñas está en el rango de 3.2 a 6.4 mm (0.125 a 0.25 pulg) y para las grandes está entre 12.7 y 25 mm (0.5 a 1 pulg). La profundidad de corte por diente depende del material de la pieza de trabajo y del acabado superficial que se requiere. Por lo general está en el rango de 0.025 a 0.075 mm (0.001 a 0.003 pulg) para brochas de tamaño medio, pero pueden ser mayores de 0.25 mm (0.01 pulg) para las grandes.

Hay brochas con diferentes perfiles de dientes, algunas con *rompevirutas* (figura 24.25). La variedad de brochas *superficiales* incluye los tipos *plano* (para cortar superficies planas),

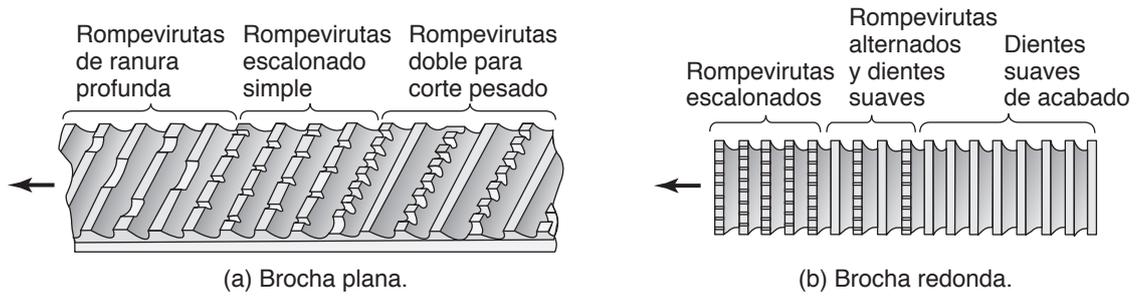


FIGURA 24.25 Características del rompevirutas en las brochas.

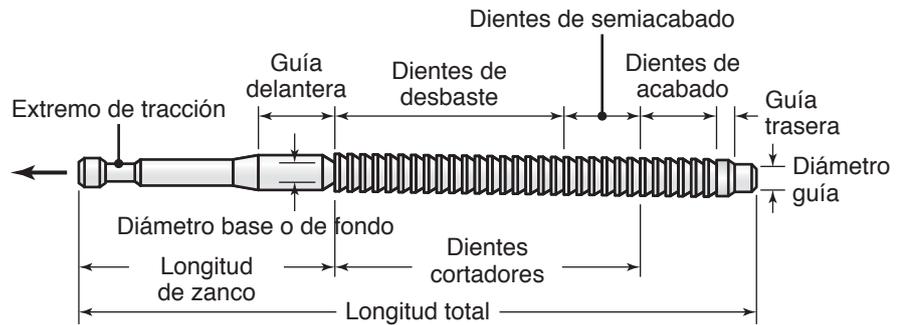


FIGURA 24.26 Terminología para una brocha interna del tipo de tracción, usada para agrandar orificios largos.

ranura, contorno, cola de milano, olla (para formas externas de precisión) y *paralela*. Los tipos de *brochado interno* incluyen el de *orificio* (para perforaciones de tolerancia estricta, formas redondas y de otro tipo, figura 24.26), *cuñeros, engranes internos y acanalado* (para barriles de armas). Las formas internas irregulares por lo general se brochan comenzando con una perforación redonda taladrada o mandrinada en la pieza de trabajo.

Brochado de giro. Es común usar este proceso para brochar las superficies de rodamiento de cigüeñales y partes similares. Se gira el cigüeñal entre centros y la brocha, que está equipada con múltiples insertos de carburo, pasa en forma tangencial a través de las superficies de rodamiento y remueve material. El brochado de giro es una combinación de *rasurar* y *adelgazar* (retirar una capa delgada de material con una herramienta cortadora de forma especial). En el brochado de giro pueden usarse con éxito brochas rectas y circulares. Incluso se han construido máquinas que brochan varios cigüeñales simultáneamente.

Brochadoras. Las máquinas para brochado son de construcción relativamente sencilla, sólo tienen movimientos lineales y por lo general actúan hidráulicamente, aunque algunas son impulsadas por mecanismos de manivelas, tornillos o cremalleras. Existen varios estilos de máquinas y sus tamaños van desde las que se usan para hacer objetos del tamaño de una aguja hasta aquellas que se emplean para brochar cañones de armas, inclusive de rifles (producen ranuras espirales internas).

Las brochadoras jalan o empujan las brochas, pueden ser horizontales o verticales. Las *brochas de empuje* por lo general son más cortas, usualmente dentro del rango de 150 a 350 mm (6 a 14 pulg). Las *brochas de tracción* tienden a enderezar el barreno, mientras que las de empuje permiten que la brocha siga cualquier irregularidad de la perforación guía. Las máquinas horizontales son capaces de hacer recorridos más largos. La *fuerza* requerida para jalar o empujar la brocha depende de (a) la resistencia del material de la pieza de trabajo, (b) la profundidad total de corte, (c) la velocidad de corte, (d) el perfil del diente y (e) el tipo de fluido de corte utilizado. Las capacidades de fuerza de tracción de las brochadoras son de hasta 0.9 MN (100 toneladas).

Parámetros del proceso. Las velocidades de corte para brochar varían de 1.5 m/min (5 pies/min) para aleaciones de alta resistencia hasta, a lo sumo, 30 m/min (100 pies/min) para aleaciones de aluminio y magnesio. Los materiales más comunes de las brochas son aceros de alta velocidad M2 y M7, así como insertos de carburo. Con objeto de lograr un mejor control de calidad, se pueden producir con técnicas de metalurgia de polvos herramientas de acero de alta velocidad para fabricar brochas (capítulo 17). Por lo general son recomendables los fluidos de corte, en especial para el brochado interno.

Consideraciones de diseño. El brochado, al igual que otros procesos de maquinado, requiere que se sigan ciertos lineamientos para obtener una producción económica y de alta calidad. Los principales requerimientos son:

- Las herramientas deben diseñarse y prepararse de modo que se sujeten con seguridad a las brochadoras y deben tener suficiente resistencia estructural y rigidez para soportar las fuerzas de corte durante el brochado.
- Las cuñas, estrías, dientes de engranes, etc., deben tener tamaños y formas estandarizadas, de modo que permitan el empleo de brochas comunes.
- Son preferibles las secciones transversales balanceadas para evitar que la brocha se mueva lateralmente y así se mantengan tolerancias exactas.
- Los radios son difíciles de brochar y se prefieren los biseles; deben evitarse los orificios invertidos o los ensambles.
- Siempre que sea posible hay que evitar los barrenos ciegos, pero si fueran necesarios debe haber un relieve al final del área que se va a brochar.

CASO DE ESTUDIO 24.1 Brochado de estrías internas

La pieza que se ilustra en la figura 24.27 está hecha de hierro nodular (65-45-15; sección 12.3.2), con estrías internas, cada una de 50 mm (2 pulg) de longitud. Las estrías tienen 19 dientes de involuta con un diámetro de paso de 63.52 mm (2.5009 pulg). Para producir las estrías se empleó una brocha de este mismo diámetro con una longitud de 1.448 m (57 pulg), 63 dientes y hecha de acero de alta velocidad M2. El corte por diente fue de 0.116 mm (0.00458 pulg). La tasa de produc-

ción fue de 63 piezas por hora. La cantidad de partes por etapa fue de 400, con una vida total de la brocha de alrededor de 6000 partes.

Fuente: Reimpreso con permiso de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.

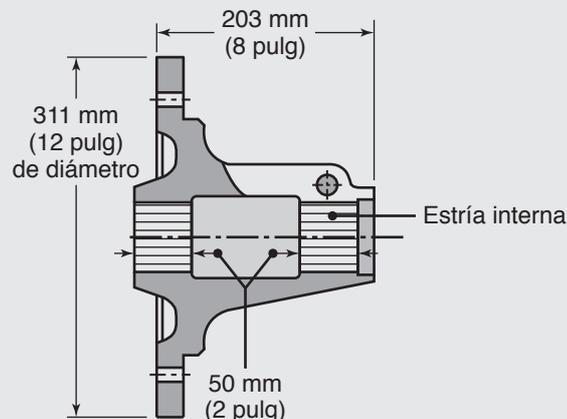


FIGURA 24.27 Ejemplo de una parte con estrías internas producidas por brochado.

24.5 Aserrado

El *aserrado* es un proceso común que se remonta a 1000 a. C. La herramienta de corte es una *hoja* (*segueta*) que tiene una serie de pequeños dientes, cada uno de los cuales remueve una pequeña cantidad de material en cada paso o movimiento de la sierra. Este proceso se usa para todos los materiales y es capaz de producir varias formas (figura 24.28). El aserrado es un proceso eficiente de remoción de material y puede producir formas casi netas a partir del material original. Al aserrar, el ancho del corte (llamado **abertura**) suele ser pequeño, por lo que el proceso desperdicia poco material.

En la figura 24.29 se presentan dientes de sierra y configuraciones de sierras comunes, donde el espaciamiento de los dientes por lo general está en el rango de 0.08 a 1.25 dientes por mm (2 a 32 por pulg). Existe una amplia variedad de tamaños, formas de dientes, espaciamiento de dientes y espesores y anchos de hoja. Las seguetas de las

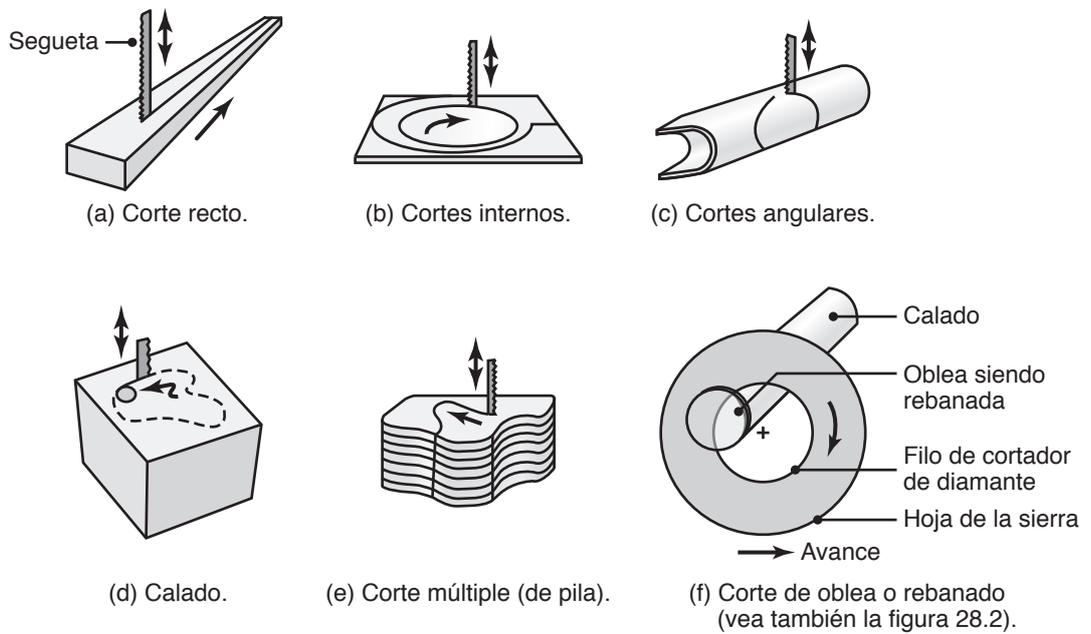


FIGURA 24.28 Ejemplos de varias operaciones de aserrado.

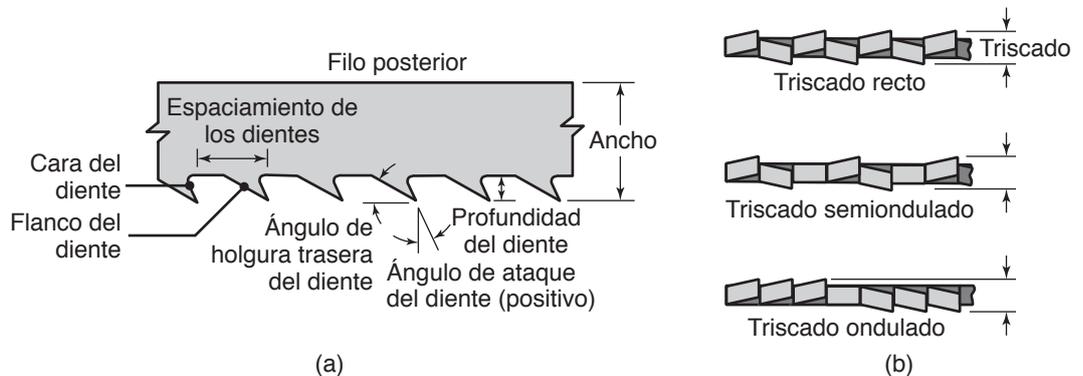


FIGURA 24.29 (a) Terminología de los dientes de sierra. (b) Tipos de triscado de dientes en las sierras, alternados para dar holgura a la hoja e impedir atascos al aserrar.

sierras por lo general están hechas de aceros al alto carbono de alta velocidad (M2 y M7); las seguetas de carburo o de acero con punta de acero de alta velocidad se usan para aserrar materiales duros y a más velocidad (figura 24.30).

El **triscado** en una sierra (figura 24.29b) es importante para dar una abertura lo suficientemente ancha como para que la sequeta se mueva con libertad en la pieza de trabajo, sin que haya atascos o una resistencia excesiva por fricción, y reducir así el calor generado. Las temperaturas elevadas tienen efectos perjudiciales en el corte, en especial al cortar termoplásticos, que se suavizan con rapidez cuando se calientan (vea la figura 7.11). El triscado también permite que la sequeta siga una trayectoria exacta, sin que se pierda el patrón que se corta. Al menos dos o tres dientes deben estar siempre en contacto con la pieza de trabajo para impedir que se *atore* la sierra (que los dientes se enganchen en la pieza de trabajo); ésta es la razón de que los materiales delgados, en especial las placas metálicas, sean difíciles de aserrar. Cuanto más delgado sea el material, más finos deben ser los dientes de la sierra y mayor el número de dientes por unidad de longitud de la sierra. Por lo general se usan fluidos de corte para mejorar la calidad del corte y la vida de la sierra.

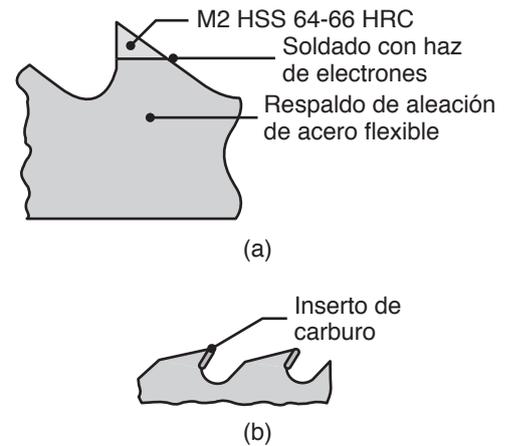


FIGURA 24.30 (a) Dientes de acero de alta velocidad soldados en una sierra de acero. (b) Insertos de carburo soldados con bronce sobre los dientes de la sierra.

Tipos de sierras. Las *sierras de arco* tienen seguetas rectas y movimientos de vaivén. Desarrolladas en la década de 1650, por lo general se utilizan para cortar barras, rodillos y formas estructurales; pueden operarse en forma manual o con un motor. Debido a que el corte tiene lugar sólo durante uno de los dos pasos del vaivén, las sierras de arco no son tan eficientes como las sierras de banda. Las seguetas de las *sierras de arco* de motor suelen tener un espesor de 1.2 a 2.5 mm (0.05 a 0.10 pulg) y hasta 610 mm (24 pulg) de largo. La tasa de pasos varía de 30 por minuto para aleaciones de alta resistencia a 180 por minuto para aceros al carbono. El marco de las sierras en las sierras de arco de motor se acciona por varios mecanismos, aplicando hasta 1.3 kN (300 libras) de fuerza a la pieza de trabajo para mejorar la tasa de corte. Las seguetas de las *sierras de mano* son más delgadas y cortas que las de las sierras de motor, las cuales tienen hasta 12 dientes por mm (32 por pulg) para aserrar placas metálicas y tubos delgados.

Las *sierras circulares*, también llamadas *sierras frías* en el corte de metal, por lo general se utilizan para aserrar con altas tasas de producción, proceso llamado *tronzado*. Las operaciones de tronzado también se pueden llevar a cabo con discos delgados *abrasivos*, como se describe en la sección 26.4. El aserrado en frío es común en la industria, en particular para cortar grandes secciones transversales. De estas sierras hay una variedad de perfiles y tamaños y se puede avanzar con cualquier ángulo en la pieza de trabajo. En las máquinas modernas, el corte con sierras circulares produce superficies relativamente suaves, con un buen control del espesor y exactitud dimensional, debido a la rigidez de las máquinas y sierras. La sierra de diámetro interno, que se ilustra en la figura 24.28f, se usa ampliamente para cortar obleas de silicio de un solo cristal para dispositivos de microelectrónica (sección 28.4).

Las *sierras de cinta* tienen seguetas continuas, largas y flexibles. Las *sierras de cinta verticales* se utilizan para el *corte de contornos* y el corte recto de hojas y otras partes planas, con apoyo en una mesa horizontal (figura 24.28d). También hay sierras de cinta controladas por computadora con la capacidad de guiar en forma automática la trayectoria del contorno. Las *sierras de cinta de motor* también se hallan disponibles; tienen mayor productividad que las sierras de arco de motor debido a su acción continua de corte. Con sierras de acero de alta velocidad, las velocidades del aserrado de aleaciones de alta resistencia son de hasta 60 m/min (200 pies/min) y de 120 m/min (400 pies/min) para aceros al carbono.

Seguetas y cables de alta resistencia pueden estar recubiertos con polvo de diamante (**seguetas con filo de diamante** y **sierras de alambre con diamante**), de modo que las partículas de diamante actúan como dientes cortadores (corte abrasivo); para este fin también se utilizan partículas de carburo. Estas seguetas y cables son apropiados para aserrar ma-

teriales duros, compósitos, metálicos y no metálicos. Los diámetros del cable varían de 13 mm (0.5 pulg) para su uso en el corte de roca hasta 0.08 mm (0.003 pulg) para cortes de precisión. Los materiales duros también se pueden aserrar con discos delgados, abrasivos, y con procesos de maquinado avanzado, descritos en el capítulo 27.

Aserrado por fricción. El *aserrado por fricción* es un proceso en el que una segueta o disco de acero blando se talla contra la pieza de trabajo, a velocidades de hasta 7600 m/min (25 000 pies/min). La energía de fricción se convierte en calor, lo que ablanda con rapidez una zona angosta en la pieza de trabajo. La acción de la segueta, que puede tener dientes o muescas para mayor eficiencia del corte, jala y expulsa de la zona de corte el metal reblandecido. El calor generado en la pieza de trabajo produce una *zona afectada por el calor* (sección 30.9) sobre las superficies de corte; así, las propiedades de la pieza de trabajo a lo largo de los bordes de corte pueden verse perjudicadas por este proceso. Debido a que sólo una pequeña porción de la segueta entra en contacto con la pieza de trabajo en cualquier momento, la segueta misma se enfría con rapidez conforme cruza el aire.

El proceso de aserrado por fricción es apropiado para metales duros ferrosos y plásticos reforzados, mas no para metales no ferrosos debido a su tendencia a adherirse a la segueta. El aserrado por fricción también se usa comúnmente para retirar las rebabas de los fundidos. Para cortar grandes secciones de acero se usan discos para aserrar por fricción hasta de 1.8 m (6 pies) de diámetro.

CASO DE ESTUDIO 24.2 Palos putt de golf

En sus esfuerzos por desarrollar palos de alta calidad y máximo rendimiento, los ingenieros de la empresa Ping Golf, Inc., utilizaron prácticas de maquinado avanzado para obtener un nuevo estilo de palo, llamado serie Anser®, que se ilustra en la figura 24.31. En respuesta a un único conjunto de restricciones de diseño, tenían la tarea y el objetivo de crear palos que fueran prácticos para las cantidades de producción y también cumplieran los requerimientos específicos de funcionamiento y estéticos.

Una de las decisiones iniciales se refería a la selección del material apropiado para que el palo cumpliera sus requerimientos funcionales. Se consideraron cuatro tipos de acero inoxidable (303, 304, 416 y 17-4 de endurecimiento por precipitación; vea la sección 5.6) para cumplir varios requerimientos de las propiedades, inclusive la maquinabilidad, durabilidad y el sonido o sensación del material particular del palo, otro requerimiento que es exclusivo del equipo para jugar golf. Entre los materiales evaluados se eligió el acero inoxidable 303 debido a que es un material de maquinado libre (sección 21.7), lo que indica que al maquinarlo genera astillas pequeñas, consume menos energía, tiene mejor acabado de la superficie y una vida mejorada para la herramienta, lo que permite velocidades de maquinado grandes y por ello una productividad mayor.

El siguiente paso del proyecto implicaba la determinación de la forma óptima de la pieza en bruto y la secuencia de operaciones a ejecutar durante la producción. Para este caso, los ingenieros escogieron desarro-

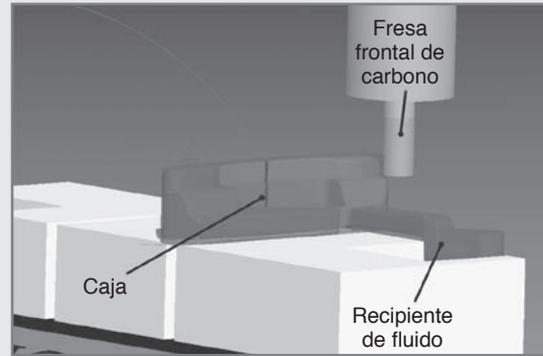
llar un material forjado de tamaño ligeramente mayor (capítulo 14). Se escogió un forjado porque brindaba una estructura granular interna favorable, al contrario de un fundido, el cual podría tener porosidad y un acabado inconsistente en su superficie una vez maquinado. La pieza en bruto incorporó una tolerancia al maquinado, con lo que las dimensiones se especificaron aproximadamente de 0.050 a 0.075 pulg (1.25 a 1.9 mm) en todas direcciones mayores que la parte final.

La tarea más difícil y larga fue desarrollar la programación necesaria y los accesorios de diseño para cada parte del palo. Más allá de los requerimientos comunes de las partes maquinadas típicas, incluyendo tolerancias estrictas y repetibles, los palos de golf requieren un conjunto adicional de especificaciones estéticas. En este caso eran imperativos tanto el maquinado preciso como la apariencia general del conjunto. Se utilizó una técnica de maquinado conocida como dar superficie o contornear (comúnmente usada en la manufactura de moldes de inyección) para maquinar la mayor parte de la geometría final. Aunque esta operación requirió maquinado adicional, proporcionó un acabado superior en todas las superficies y permitió el maquinado de geometrías más complejas, lo que agregó valor al producto final.

Igual que para todas las partes maquinadas en grandes volúmenes, la repetibilidad era esencial. Cada pieza en bruto forjada se diseñó con una protrusión a través de la cara del palo, lo que permitió la ubicación inicial de las superficies, para mayor facilidad de acomodar los arreglos de sujeción. Una operación



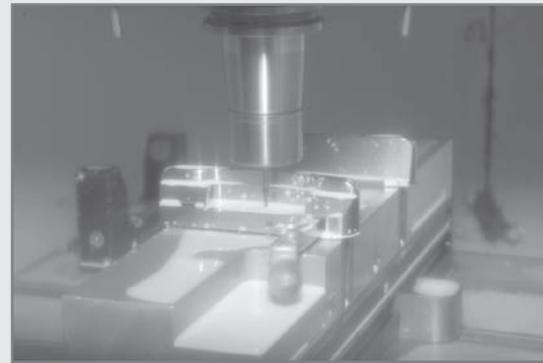
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 24.31 (a) Palo de golf Ping Anser®; (b) modelo CAD del maquinado de desbaste de la superficie externa del palo; (c) maquinado de desbaste en un centro de maquinado vertical y (d) maquinado de los letteros en un centro de maquinado vertical; la operación se detuvo para tomar la fotografía ya que la zona de corte normalmente opera con fluido de corte. *Fuente:* Impreso con permiso de Ping Golf, Inc., Phoenix, Arizona.

de maquinado corta retiró una pequeña cantidad de material alrededor de la barra y produjo tres superficies planas, cuadradas, como ubicación de referencia para la primera operación de maquinado principal.

Cada palo requirió seis operaciones diferentes, con el fin de maquinar todas sus superficies, y cada operación estuvo diseñada para generar superficies de localización para el siguiente paso del proceso de manufactura. Se prepararon varias operaciones con el uso de un sistema de carga tipo lápida (vea la sección 37.8) en una fresadora CNC de husillo horizontal. Este método permitió que los operadores de las máquinas cargaran y descargaran partes mientras se maquinaban otras, lo que incrementó de manera significativa la eficiencia de la operación.

Los arreglos fijos modulares y el uso de herramientas cortadoras de carburo de tungsteno recubiertas con TiAlN (sección 22.5.2) permitieron el cambio rápido entre las partes de mano derecha y las de mano izquierda, así como de diferentes modelos de palo. Una vez

terminada la operación inicial de localización, se transfirieron las partes a un centro de maquinado vertical de tres ejes (vea, por ejemplo, la figura 25.7) para cortar la caja escalonada del palo. Como los materiales forjados estaban en su forma casi neta, la profundidad radial máxima del corte en la mayoría de las superficies fue de 0.075 pulg, pero la profundidad axial de corte de 1.5 pulg dentro de la caja escalonada del palo fue la operación de fresado más demandante (vea las figuras 24.31b y c). El palo tiene radios interiores pequeños con una profundidad comparativamente larga (7 veces el diámetro o más).

Se utilizó un centro de maquinado horizontal de cuatro ejes (vea por ejemplo la figura 25.2) para reducir la cantidad de etapas de esta operación. El eje rotatorio se empleó para crear la geometría relativamente compleja de la manguera (entrada del eje del palo). Como esta caja escalonada carece relativamente de soporte, el traqueteo fue la dificultad más compleja de superar. Se hicieron varias iteraciones con las velocidades del hu-

(continúa)

sillo junto con la guía frontal a partir de un modelo de simulación. Se realizaron análisis modales de las partes acomodadas en los accesorios fijos, en un intento por identificar y evitar las frecuencias naturales de la parte o del accesorio (vea la sección 25.4). Las máquinas tenían velocidades que iban de 12 000 a 20 000 rpm, cada una de 30 hp. Con la forja en forma casi neta, las operaciones de fresado se diseñaron para tener pocas profundidades de corte, pero alta velocidad.

Después de terminar cada operación de maquinado se necesitaba un poco de trabajo de acabado a mano para producir un aspecto superior de la superficie. Des-

pués, los palos se pulieron ligeramente con un proceso de granallado (con cuentas de vidrio, sección 34.2) con el propósito de lograr la consistencia de la superficie. Luego se aplicó un recubrimiento negro de níquel-cromo (sección 34.9) a todas las partes, para mejorar su estética y proteger el acero inoxidable de pequeños tintineos y abolladuras y de la corrosión por productos químicos específicos que podrían encontrarse en un campo de golf.

Fuente: Basado en D. Jones y D. Petersen, Ping Golf, Inc.

24.6 Limado

El *limado* implica la remoción en pequeña escala de material de una superficie, esquina, borde u orificio, inclusive el retiro de rebabas (vea la figura 16.2). Las limas se desarrollaron por primera vez alrededor del año 1000 a. C., por lo general están hechas de acero endurecido y existen en varias secciones transversales: planas, redondas, hemisféricas, cuadradas y triangulares. Las limas tienen distintas formas de dientes y grados de dureza. Aunque en general el limado se ejecuta a mano, existen *limadoras* con características automáticas para altas tasas de producción y con limas recíprocas de hasta 500 pasos/min.

Las *limas de banda* consisten en segmentos de lima, cada uno de alrededor de 75 mm (3 pulg) de longitud, que se fijan a una banda flexible de acero y se utilizan en forma parecida a las sierras de banda. También hay *limas de disco*. Las *limas rotatorias* y los *matafilos* (figura 24.32) se emplean para aplicaciones como la eliminación de rebabas, remoción de escamas de las superficies, producción de chaflanes en las partes y el retiro de pequeñas cantidades de material en la manufactura de dados. Estas herramientas por lo general tienen forma cónica, cilíndrica o esférica, y varios perfiles de dientes. Su acción de corte (similar a la de las brochas, sección 23.6) remueve pequeñas cantidades de material a tasas elevadas. La velocidad rotacional de los matafilos varía de 1500 rpm para cortar aceros (con matafilos grandes) a tanto como 45 000 rpm para magnesio (rebabas pequeñas).

24.7 Manufactura de engranes por medio de maquinado

En las partes II y III se describieron varios procesos para fabricar engranes o producir dientes de engranes en varios componentes, como son fundición, forjado, extrusión, trefilado, laminado de roscas y metalurgia de polvos. El *troquelado* de una placa metálica también puede usarse para fabricar engranes delgados, como los que se usan en relojes mecánicos de pulso o pared y otros mecanismos parecidos. Los engranes de plástico se pueden fabricar con procesos como fundición (capítulo 11) y el moldeado por inyección (sección 19.3).

Los engranes pueden ser tan pequeños como los de un reloj de pulso o hasta de 9 m (30 pies) de diámetro para superestructuras de grúas giratorias móviles y equipo de minería. La exactitud dimensional y el acabado superficial que requieren los engranes dependen del uso a que se destinen. Una mala calidad de los dientes del engrane contribuye a la transmisión ineficiente de energía, a mayor vibración y ruido y a efectos perjudiciales por las características de fricción y desgaste del engrane. Por ejemplo, los engranes



FIGURA 24.32 Tipos de matafilos usados en las operaciones de eliminación de rebabas.

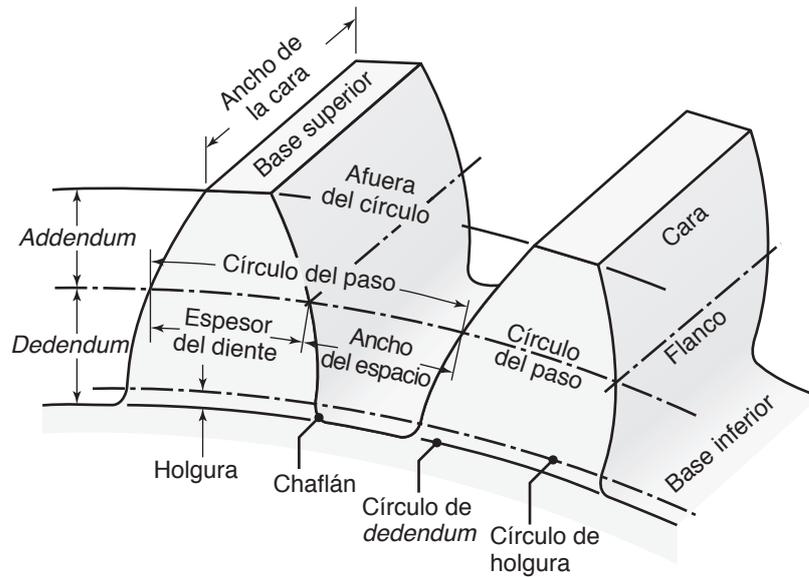


FIGURA 24.33 Nomenclatura de un engrane recto de involuta.

nes de submarinos tienen que ser de extremadamente buena calidad con el fin de reducir los niveles de ruido y así evitar su detección.

En la figura 24.33 se presenta la nomenclatura estándar para un engrane recto de involuta. Se comienza con una pieza en bruto fundida o forjada y hay dos métodos de fabricar sus dientes: por corte de forma y por generación.

24.7.1 Corte de forma

En el *corte de forma*, la herramienta de corte es semejante a una fresa de forma hecha siguiendo la forma del espacio entre los dientes del engrane (figura 24.34a). La forma de los dientes del engrane se reproduce por maquinado del engrane original alrededor de su periferia. El cortador se mueve axialmente a lo largo de la longitud del diente, y a la profundidad apropiada, con el fin de producir el perfil del diente. Después de cortar cada diente se retira el cortador, se gira el engrane original (*indexado*) y el cortador procede a cortar otro diente; este proceso continúa hasta que se hayan maquinado todos los dientes. Cada cortador está diseñado para cortar cierto número de dientes.

La precisión del perfil de la forma por cortar para el diente depende de la exactitud del cortador y de la máquina y su rigidez. Debido a que el cortador tiene una geometría fija, el corte de la forma se puede usar sólo para producir dientes que tengan un ancho constante, es decir, en engranes rectos o helicoidales pero no en los de tipo cónico. Los engranes internos y los dientes en superficies rectas, como los de una cremallera y piñón, se forman con un cortador con forma sobre una máquina semejante a una formadora.

También se puede usar el *brochado* para maquinar dientes de engranes, lo que es particularmente apropiado para producir dientes internos. El proceso de brochado es rápido y produce un buen acabado de la superficie con gran exactitud dimensional. Sin embargo, debido a que se requiere un brochado diferente para cada tamaño de engrane (y las brochas son caras), este método es adecuado casi exclusivamente para producción en grandes cantidades.

Aunque ineficiente, el corte de forma también se puede hacer en fresadoras, con el cortador montado en un soporte y el engrane original montado en un cabezal divisorio. Los dientes del engrane también pueden cortarse en máquinas especiales con una herramienta cortadora de un solo punto, guiada por una *plantilla* con la forma del perfil del

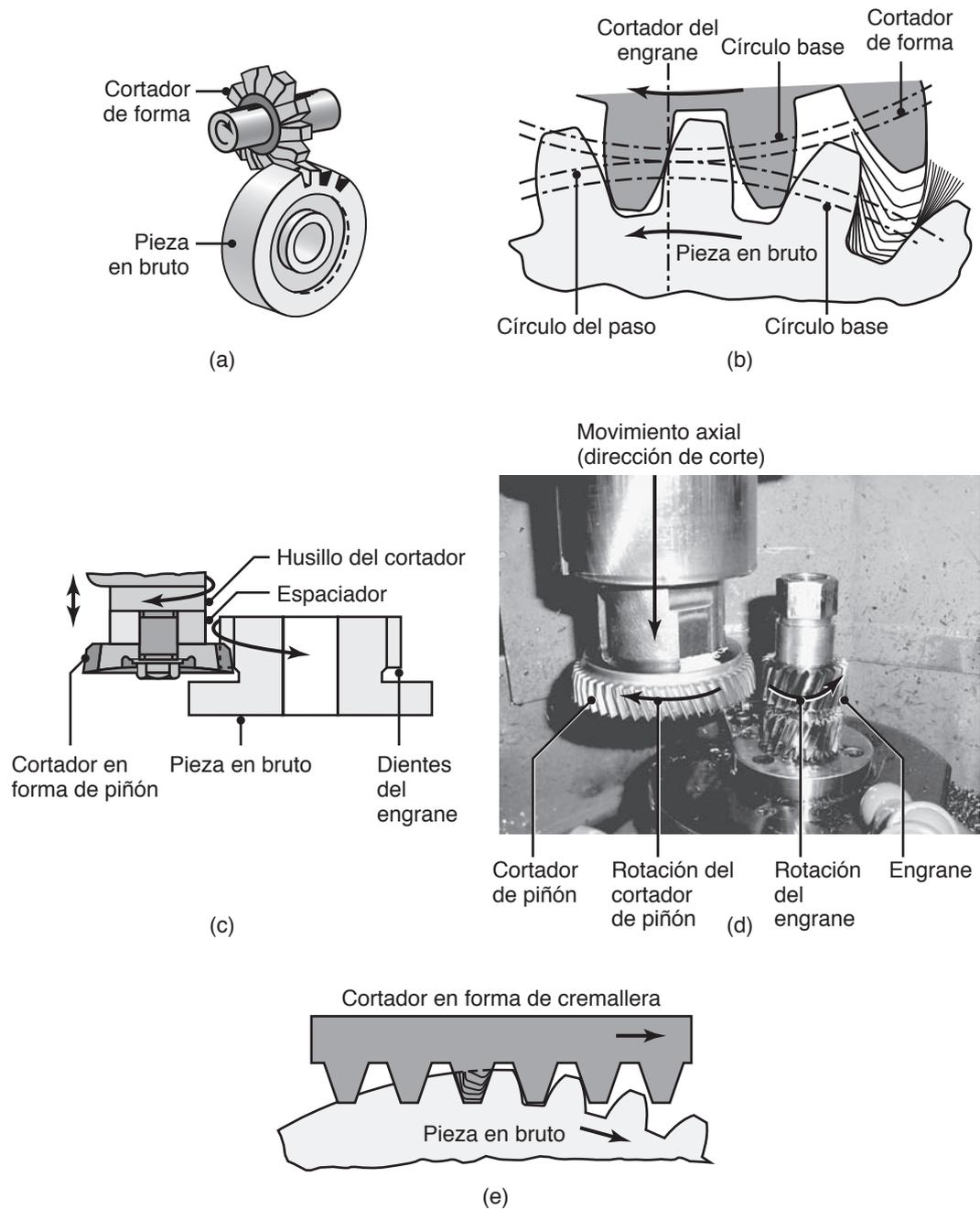


FIGURA 24.34 (a) Producción de un diente sobre la pieza en bruto por medio del corte de forma. (b) Ilustración esquemática de la generación de un engrane con un cortador de engranes en forma de piñón. (c) y (d) Generación de un engrane en un formador de engranes por medio de un cortador de piñón; observe que el cortador es recíproco verticalmente. (e) Generación de un engrane con un cortador en forma de cremallera. Fuente: (d) Cortesía de Schafer Gear Works, Inc.

diente del engrane. Debido a que la plantilla puede ser mucho más grande que el diente del engrane, la exactitud dimensional mejora.

El corte de forma es un proceso relativamente sencillo y puede usarse para cortar dientes de engranes con varios perfiles. No obstante, es una operación lenta y además ciertos tipos de máquinas requieren mano de obra especializada. Las máquinas con características semiautomáticas son rentables para hacer cortes de forma con base en una producción

limitada. Sin embargo, en general el corte de forma es apropiado sólo para cantidades bajas de producción.

24.7.2 Generación de engranes

La herramienta cortadora que se usa para la *generación de engranes* puede ser un cortador en forma de piñón, un cortador recto en forma de cremallera, o una fresa generadora o generatriz.

1. Un **cortador en forma de piñón** se puede considerar como uno de los dos engranes de un par y el otro engrane es la pieza en bruto (figura 24.34b). Este tipo de cortador se usa en *formadoras de dientes* verticales (figuras 24.34c y d). El cortador tiene un eje paralelo al engrane de la pieza en bruto y rota lentamente con ésta a la misma velocidad del círculo de paso y en un movimiento de vaivén axial. Un tren de engranes proporciona el movimiento relativo requerido entre el eje del cortador y el eje de la pieza en bruto. El corte puede tener lugar ya sea en la carrera de bajada o de subida de la máquina. Debido a que la holgura que se requiere para el paso del cortador es pequeña, el proceso de formar engranes es apropiado para aquellos que se localizan cerca de superficies que obstruyen, por ejemplo una brida, como se ilustra en las figuras 24.34c y d. Este proceso puede usarse para cantidades de producción bajas o altas.
2. En un **formador de cremallera**, la herramienta generadora es un *segmento de cremallera* (figura 24.34e) que va y viene en dirección paralela con el eje del engrane de la pieza en bruto. Debido a que no es práctico tener más de 6 a 12 dientes en un cortador de cremallera, el cortador debe soltarse a intervalos apropiados y regresar al punto de origen. El engrane de la pieza en bruto permanece fijo durante esta operación.
3. Una **fresa generadora** o **generatriz** (figura 24.35) es básicamente un gusano, o tornillo, que corta engranes y está construida en una herramienta generadora de engranes por medio de una serie de ranuras longitudinales o entalladura maquinadas en ella para formar el diente cortador. Cuando se forma un engrane recto por medio de una generatriz, el ángulo entre ésta y el engrane en bruto es de 90° menos el ángulo de avance en las cuerdas del gusano. Todos los movimientos en la fresa son rotatorios y la generatriz y el engrane de la pieza en bruto giran continuamente, como si fueran dos engranes en funcionamiento, hasta que se cortan todos los dientes.

Hay generatrices con una, dos o tres cuerdas. Por ejemplo, si la fresa tiene una sola cuerda y el engrane ha de tener 40 dientes, la fresa y el husillo del engrane deben acoplarse juntos de modo que la fresa describa 40 revoluciones, en tanto que el engrane de la pieza en bruto gira una revolución. Igualmente, si se usa una fresa de doble cuerda, ésta describirá 20 revoluciones y el engrane de la pieza en bruto una revolución. Además, la fresa debe avanzar en forma paralela al eje del engrane por una distancia mayor que el ancho de la cara de los dientes del engrane (figura 24.33) con el fin de producir dientes rectos en los engranes tipo recto. Pueden usarse las mismas generatrices y máquinas para cortar engranes helicoidales inclinando el eje del husillo de la fresa.

Debido a que produce una variedad de engranes a tasas elevadas y con buena exactitud dimensional, la generación de engranes con generatriz se usa mucho en la industria. Aunque el proceso también es apropiado para cantidades bajas de producción, resulta más económico para las medias o altas.

Las máquinas generadoras de engranes también producen engranes cónicos en espiral e hipoides. Igual que la mayor parte de máquinas herramientas, las generadoras de engranes modernas están controladas por computadora. Las *máquinas de ejes múltiples controladas por computadora* son capaces de generar muchos tipos y tamaños de engranes usando fresas indexables.

24.7.3 Corte de engranes cónicos

Los *engranes cónicos rectos* por lo general se obtienen en un corte, con un cortador de forma, en máquinas que indexan automáticamente; después, en un generador de engranes, se da el acabado al engrane en su tamaño apropiado. Los cortadores son en vaivén a través de



Código QR 24.4 Corte de un engrane. (Fuente: Cortesía de Sandvik Coromant).

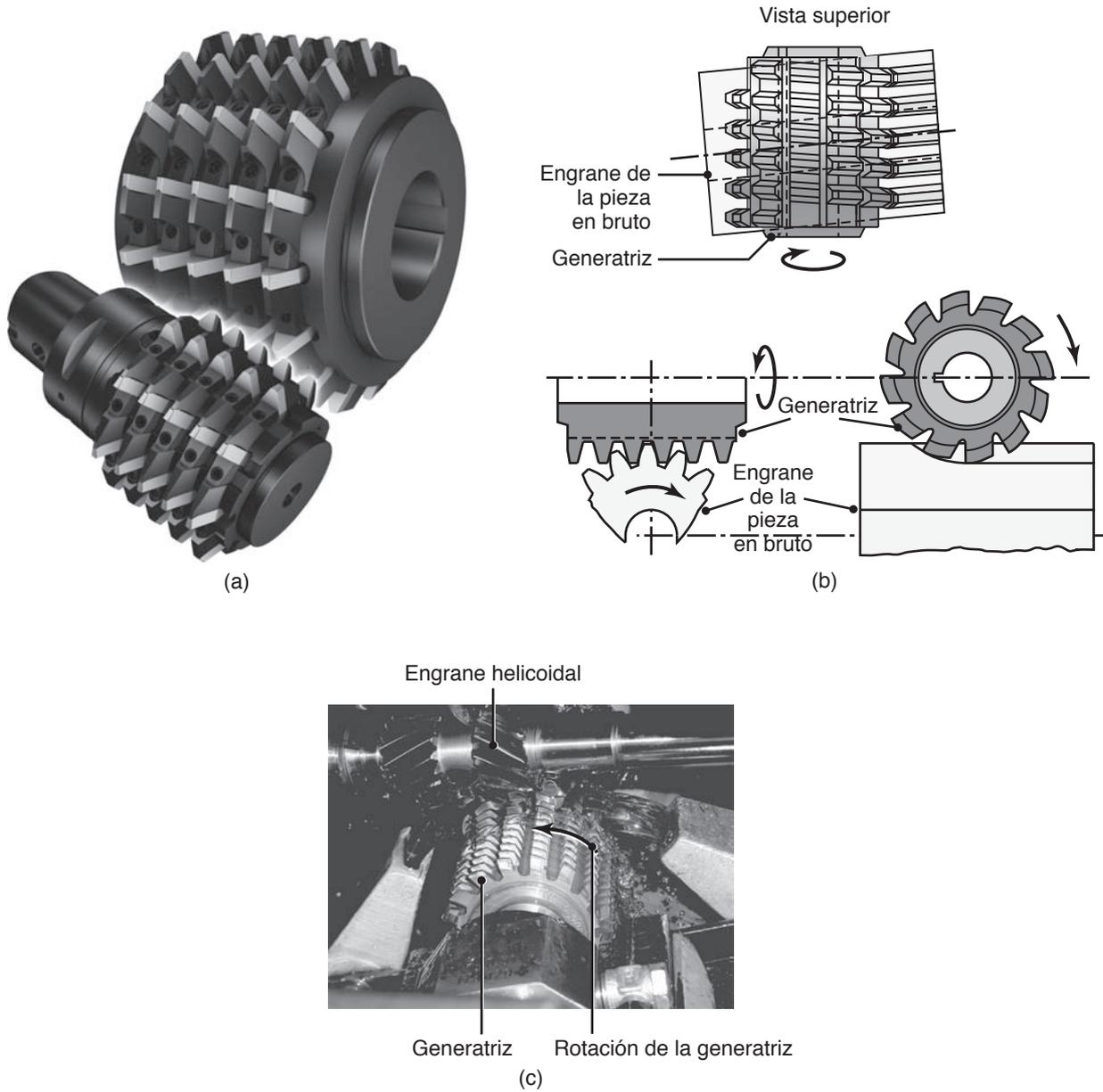


FIGURA 24.35 (a) Generatrices para maquinar dientes de engranes; (b) ilustración esquemática del corte de engranes con una generatriz y (c) producción de un engrane de gusano por medio de fresado. Fuente: (a) Cortesía de Sandvik Coromant y (c) cortesía de Schafer Gear Works, Inc.

la cara del engrane cónico, igual que la herramienta en una formadora (figura 24.36a). Las máquinas para engranes cónicos en espiral operan esencialmente con el mismo principio, en el cual el cortador en espiral es básicamente una fresa de refrentado con cierto número de hojas cortadoras de lado recto que se introducen desde su periferia (figura 24.36b).

24.7.4 Procesos de acabado de engranes

Al producirse por cualquiera de los procesos descritos, el acabado de la superficie y la exactitud dimensional de los dientes del engrane tal vez no sean adecuados para ciertas aplicaciones específicas. Además, los engranes pueden ser ruidosos, o sus propiedades mecánicas, en especial la vida de fatiga y la resistencia al desgaste, podrían no ser acep-

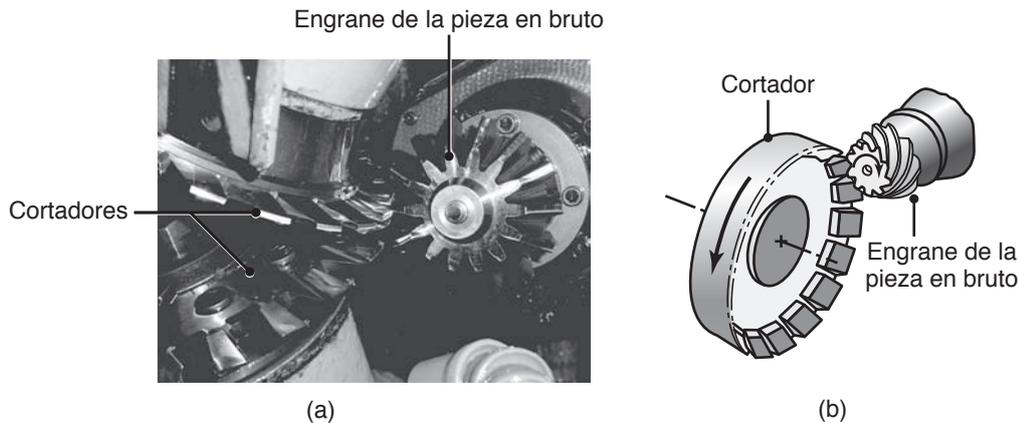


FIGURA 24.36 (a) Corte de un engrane cónico recto con dos cortadores. (b) Corte de un engrane cónico helicoidal. *Fuente:* Cortesía de Schafer Gear Works, South Bend, Indiana, Estados Unidos.

tables. Hay varios *procesos de acabado* para mejorar la calidad de la superficie de los engranes, la elección dependerá del método de manufactura del engrane, del rendimiento deseado y de si los engranes han sido endurecidos por tratamiento térmico. Como se describió en el capítulo 4, el tratamiento térmico puede ocasionar distorsión de las partes; en consecuencia, para un perfil preciso de los dientes del engrane, es común que los engranes tratados con calor se sujeten a operaciones de acabado apropiadas.

Rasurado (Afilado). El proceso de rasurado de engranes involucra un *cortador*, hecho en la forma exacta del perfil del diente terminado, lo que remueve cantidades muy pequeñas de metal de la superficie de los dientes del engrane. El cortador, que tiene un movimiento de vaivén, tiene dientes ranurados o en tajo en varios puntos a lo largo de su anchura, lo que hace que el proceso sea semejante al brochado fino. El rasurado y bruñido (que se describe a continuación) se lleva a cabo sólo en engranes con dureza de 40 HRC o menor.

Aunque las herramientas son caras y se requieren máquinas especiales, el rasurado es rápido y es el proceso más comúnmente usado para terminar engranes. Produce dientes de engranes con un mejor acabado superficial y una buena exactitud dimensional del perfil del diente. Los engranes rasurados se pueden tratar térmicamente después para darles mejor dureza, resistencia al desgaste y un perfil de diente más exacto.

Bruñido por rodadura. El acabado de la superficie de los dientes del engrane también puede mejorarse por medio del bruñido. Se introdujo en la década de 1960, y básicamente se trata de un proceso de deformación plástica superficial (vea la sección 34.2), mediante un dado especial (matriz) en forma de engrane, endurecido, el cual sujeta las superficies de los dientes a una acción de rodamiento (llamada **rodamiento del engrane**). El trabajo en frío resultante de las superficies de los dientes no sólo mejora el acabado de la superficie, sino también induce tensiones residuales a la compresión sobre las superficies de los dientes del engrane, lo que mejora su vida de fatiga. Sin embargo, se ha demostrado que el bruñido no mejora significativamente la exactitud dimensional del diente del engrane. Con engranes por metalurgia de polvos, el bruñido lleva a una densificación de la superficie, con una mejora significativa de su rendimiento (vea la sección 17.5).

Rectificado, asentado y lapeado. Para la exactitud dimensional más alta en el espaciado y forma de los dientes, y en su acabado superficial, éstos pueden sujetarse al rectificado, asentado y lapeado, como se describe en el capítulo 26. Se usan ruedas (piedras) abrasivas especialmente habilitadas para rectificar, ya sea para formar o generar superficies de los dientes del engrane. Hay varios tipos de ruedas, y el que se usa más comúnmente es el formador de costilla. En el **rectificado de forma**, la forma de la rueda abrasiva es



Código QR 24.5 Corte de un engrane cónico. (*Fuente:* Cortesía de Sandvik Coromant).

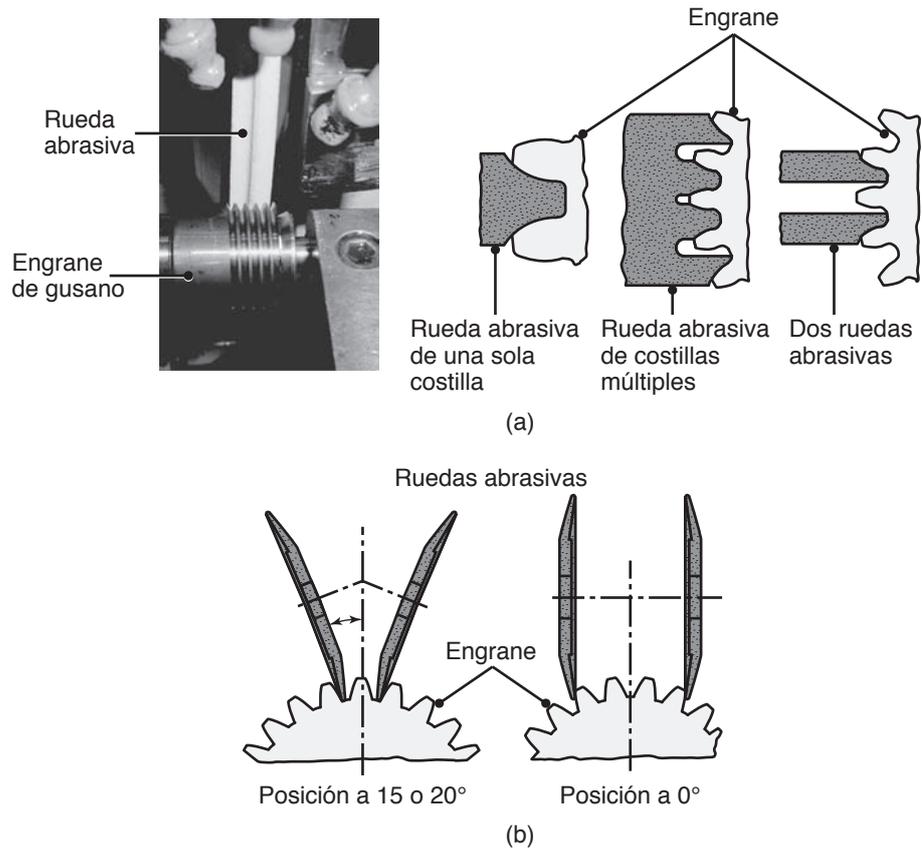


FIGURA 24.37 Acabado de engranes por rectificado: (a) rectificado de forma, con ruedas abrasivas formadas, y (b) rectificado por generación, mediante dos ruedas abrasivas.

idéntica al espaciado de los dientes (figura 24.37a). En la **generación**, la rueda generadora actúa en forma parecida al cortador generador de engranes que ya se describió antes (figura 24.37b).

La herramienta de **asentado** es un engrane de plástico impregnado con partículas abrasivas. El proceso de asentado es más rápido que el de rectificado y se usa para mejorar el acabado de la superficie. Para un mejor acabado, los dientes del engrane son **lapeados** utilizando compuestos abrasivos ya sea con (a) una herramienta lapeadora en forma de engrane hecha de hierro fundido o bronce, o (b) un par de engranes acoplados que funcionan juntos. Aunque las tasas de producción son más bajas y los costos son mayores, estas operaciones de acabado son apropiadas en particular para producir engranes endurecidos de muy alta calidad, vida prolongada y operación silenciosa.

24.7.5 Consideraciones de diseño y economía del maquinado de engranes

Las consideraciones del diseño para las operaciones de corte de engranes se resumen como sigue:

- Los engranes deben maquinarse de preferencia antes de su ensamble en ejes; los engranes amplios son más difíciles de maquinar que los estrechos.
- Debe darse suficiente holgura entre los dientes del engrane y sus bordes, hombros y otras características de la parte, de modo que la herramienta cortadora pueda maquinar sin interferencias.

- El diseño original es importante para tener una sujeción apropiada y para facilitar las operaciones de corte. Deben darse tolerancias de maquinado en la pieza en bruto, y si al maquinado le van seguir operaciones posteriores de acabado, la parte debe tener un excedente de tamaño después de ser maquinada; es decir, debe tener una tolerancia de acabado después de ser maquinada.
- Los engranes rectos son más fáciles de maquinar que los helicoidales, los cuales a su vez son más fáciles de maquinar que los cónicos o de gusano.
- Las tolerancias dimensionales y formas estandarizadas están especificadas por las normas de la industria. Debe seleccionarse un número de calidad del engrane de modo que éste tenga un rango de tolerancia tan amplio como sea posible y a la vez cumpla con los requerimientos del servicio.

Economía. Como en todas las operaciones de maquinado, el costo de los engranes se incrementa con rapidez de acuerdo con el mejor acabado de la superficie y la calidad del engrane. La figura 24.38 muestra el costo relativo de la manufactura de engranes como función de la calidad, según la especifica la AGMA (American Gear Manufacturers Association o Asociación Estadounidense de Fabricantes de Engranes). Cuanto mayor sea el número, mayor es la exactitud dimensional de los dientes del engrane. Como se aprecia en la figura, el costo de manufactura puede variar hasta en dos órdenes de magnitud, lo que depende de las tolerancias dimensionales.

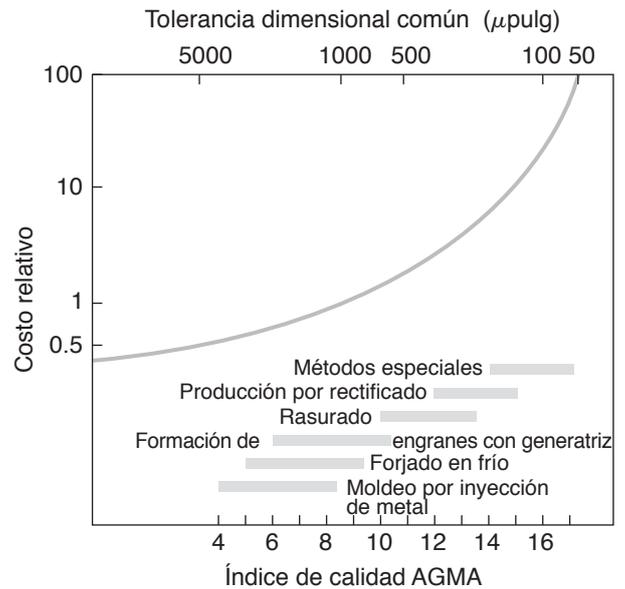


FIGURA 24.38 Costo de la manufactura de engranes como función de su calidad.

RESUMEN

- Pueden maquinarse varias formas complejas por medio de los procesos descritos en este capítulo. El fresado es uno de los más comunes, ya que es capaz de producir de manera económica varias formas y tamaños a partir de un gran número de materiales de la pieza de trabajo.
- Aunque estos procesos básicamente son similares al torneado, taladrado y mandrinado, e involucran una mecánica parecida de corte, materiales de la herramienta y fluidos de corte, la mayoría de los procesos descritos en este capítulo utilizan cortadores de dientes múltiples y herramientas con distintos ejes con respecto a la pieza de trabajo.
- Las máquinas herramientas usadas para producir formas complejas están controladas en su mayor parte por computadora y tienen distintas características especiales, lo que les da mucha más flexibilidad en su aplicación que la de las máquinas herramienta tradicionales.
- El brochado es un método para ensanchar con exactitud un barreno redondo u otros perfiles en una pieza de trabajo. El aserrado es la remoción gradual de material por medio de dientes pequeños espaciados en una segueta y es muy versátil. El limado implica la remoción en pequeña escala de material de una superficie, en especial la eliminación de rebabas y bordes afilados.
- Además de producirse con varios procesos de formado, los engranes también se producen con maquinado, ya sea por corte o generación; este último produce engranes con mejor acabado de la superficie y más exactitud dimensional. La calidad del perfil de los dientes del engrane mejora más con las operaciones de acabado, tales como el rasurado, bruñido, rectificado, asentado y lapeado.

TÉRMINOS CLAVE

Abertura o ranura de corte (Kerf)	Brochado	Fresado	Limado
Árbol	Brochado de giro	Fresado concurrente	Rasurado
Asentado	Bruñido	Fresado de alta velocidad	Rebaba
Aserrado	Cepillado de mesa	Fresado de bloque	Sujetador de pieza
Aserrado por fricción	Corte al vuelo	Fresado frontal	Talla de dados
Brocha de empuje	Corte de forma	Fresado refrentado	Triscado
Brocha de tracción	Formador de cremallera	Generación de engranes	Volteado
	Fresa generadora o generatriz	Lapeado	

BIBLIOGRAFÍA

- ASM *Handbook*, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.
- Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 3a. ed., Marcel Dekker, 2005.
- Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998
- Davim, J. P. (ed.), *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, Springer 2010.
- Davis, J. R. (ed.), *Gear Materials, Properties and Manufacture*, ASM International, 2006.
- Joshi, P. H., *Machine Tools Handbook*, McGraw-Hill, 2008.
- Kibbe, R. R., Neely, J. E., White, W. T. y Meyer, R. O., *Machine Tool Practices*, 9a. ed., Prentice Hall, 2009.
- Krar, S. F. y Check, A. F., *Technology of Machine Tools*, 6a. ed., Glencoe Macmillan/McGraw-Hill, 2009.
- Lopez, L. N. y Lamikiz, A. (eds.), *Machine Tools for High Performance Machining*, Springer, 2009.
- Radzevich, S. P., *Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture*, 2a. ed., CRC Press, 2012.
- Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles*, 2a. ed., Oxford University Press, 2005.
- Stephenson, D. A. y Agapiou, J. S., *Metal Cutting: Theory and Practice*, 2a. ed., Marcel Dekker, 2006.
- Walsh, R.A., *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook*, 3a. ed., McGraw-Hill, 2006.

PREGUNTAS DE REPASO

- 24.1** Explique por qué el fresado es una operación versátil del maquinado.
- 24.2** Describa una fresadora. ¿En qué se diferencia de un taladro vertical?
- 24.3** Describa los diferentes tipos de cortadores que se usan en las operaciones de fresado y dé una aplicación de cada tipo.
- 24.4** Defina los siguientes conceptos: fresado frontal, fresado periférico, fresado refrentado, fresado de ranura, fresado de roscas.
- 24.5** ¿Pueden maquinarse roscas en una fresadora? Explique.
- 24.6** ¿Cuál es la diferencia entre el avance y el avance por diente? ¿Podrían ser lo mismo?
- 24.7** Explique las características relativas del fresado convencional y el fresado concurrente.
- 24.8** Describa las características geométricas de una brocha y explique sus funciones.
- 24.9** ¿Qué es una brocha de tracción? ¿Y una de empuje?
- 24.10** ¿Por qué el aserrado es un proceso de uso común? ¿Por qué ciertas seguetas tienen dientes espaciados? Explique.
- 24.11** ¿Qué ventajas tienen las fresadoras tipo bancada sobre las de tipo columna y rodilla en cuanto a las operaciones de producción?
- 24.12** Explique por qué el eje de una generatriz está inclinado con respecto al eje del engrane de la pieza en bruto.
- 24.13** ¿Qué es una fresa de concha? ¿Por qué se usa?
- 24.14** ¿Por qué es difícil aserrar placas metálicas delgadas?
- 24.15** De los procesos ilustrados en la figura 24.2, ¿cuál es el más parecido al de generatriz?
- 24.16** Describa el movimiento de la herramienta durante el formado de engranes.
- 24.17** ¿Cuándo es necesario el limado?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 24.18** ¿Consideraría el lector los procesos de maquinado descritos en este capítulo como si fueran de forma neta o casi neta? Explique con ejemplos apropiados.
- 24.19** ¿Por qué el fresado de acabado es un proceso tan importante y versátil? Explique con ejemplos.

24.20 Ponga en una lista y explique los factores que contribuyen a un mal acabado de la superficie en los procesos descritos en este capítulo.

24.21 ¿Son las marcas de avance que deja en la pieza de trabajo una fresa de refrentado verdaderos segmentos de un círculo real? Explique utilizando dibujos apropiados.

24.22 Explique por qué el brochado de los rodamientos de un cigüeñal es una alternativa atractiva en relación con otros procesos de maquinado.

24.23 En este capítulo se presentan varios lineamientos para distintas operaciones de corte. Analice el razonamiento tras los lineamientos.

24.24 ¿Qué ventajas tienen los dientes helicoidales sobre los rectos en los cortadores para el fresado de bloque?

24.25 Explique por qué las sierras de arco no son tan productivas como las de cinta.

24.26 ¿Qué semejanzas y diferencias hay en hacer una hendidura con una fresa o con una sierra?

24.27 ¿Por qué los engranes maquinados tienen que sujetarse a operaciones de acabado? ¿Cuáles de los procesos de acabado no son adecuados para dientes de engranes endurecidos? ¿Por qué?

24.28 ¿Cómo reduciría usted la rugosidad de la superficie que se muestra en la figura 24.8? Explique.

24.29 ¿Por qué son útiles las máquinas como la que se ilustra en la figura 24.20?

24.30 Comente acerca de los diseños ilustrados en la figura 24.23b y sobre la utilidad de las operaciones de brochado.

24.31 Explique cómo puede empezar el corte de contorno en una sierra de cinta, como se muestra en la figura 24.28d.

24.32 En la figura 24.30a, los dientes cortadores de acero de alta velocidad están soldados a una hoja de acero. ¿Recomendaría el lector que toda la hoja fuera de acero de alta velocidad? Explique sus razones.

24.33 Describa las partes y condiciones en las que el brochado sería el método más preferido del maquinado.

24.34 Con trazos apropiados, explique las diferencias y semejanzas entre las operaciones de rasurado, brochado y brochado de giro.

24.35 Explique la razón por la cual es difícil usar aserrado de fricción en metales no ferrosos.

24.36 ¿Recomendaría usted el brochado de una cuña en un engrane de la pieza en bruto antes o después de maquinar los dientes del engrane? ¿Por qué?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

24.37 En las operaciones de fresado, con respecto al tiempo total de corte pueden influir de manera importante (a) la magnitud de la distancia sin corte, l_c , que se muestra en las figuras 24.5 y 24.6, y (b) la razón del ancho de corte, w , al diámetro del corte, D . Dibuje varias combinaciones de estos parámetros, dé las dimensiones, seleccione avances y velocidades de corte, etc., y determine el tiempo de corte total. Haga comentarios sobre sus observaciones.

24.38 Se realiza una operación de fresado en bloque a una velocidad especificada de corte (velocidad superficial del cortador) y avance por diente. Explique el procedimiento para determinar la velocidad requerida de la mesa.

24.39 Demuestre que la distancia l_c en el fresado de bloque es aproximadamente igual a \sqrt{Dd} para situaciones en las que $D \gg d$ (vea la figura 24.5c).

24.40 En el ejemplo 24.1, ¿cuál de las cantidades será afectada cuando el avance se incremente a $f = 0.02$ pulg/diente?

24.41 Calcule la profundidad de la viruta del corte, t_c , y el torque en el ejemplo 24.1.

24.42 Estime el tiempo requerido para el fresado refrentado de un bloque de latón de 10 pulgadas de largo y 1 pulgada de ancho con un cortador de 6 pulgadas de diámetro con 10 insertos de acero de alta velocidad.

24.43 Se corta una placa de 12 pulgadas de longitud y 1 pulgada de espesor en una sierra de cinta a 150 pies/min. La sierra tiene 12 dientes por pulgada. Si el avance por diente es de 0.003 pulgadas, ¿cuánto tiempo tomará aserrar la placa en toda su longitud?

24.44 Se usa un generatriz de una sola cuerda para cortar 40 dientes en un engrane recto. La velocidad de corte es de 120 pies/min y la generatriz tiene 3 pulgadas de diámetro. Calcule la velocidad rotacional del engrane recto.

24.45 Suponga que en una operación de fresado refrentado, como el que se ilustra en la figura 24.6, las dimensiones de la pieza de trabajo son de 4 pulgadas por 10 pulgadas. El cortador tiene 6 pulgadas de diámetro, ocho dientes y gira a 300 rpm. La profundidad de corte es de 0.125 pulgadas y el avance es de 0.005 pulg/diente. Suponga el requerimiento específico de energía para este material y que sólo 75% del diámetro del cortador entra en contacto durante el corte. Calcule (a) la potencia requerida y (b) la tasa de remoción de material.

24.46 Se ejecutará una operación de fresado de bloque en una pieza de 300 mm de largo y 40 mm de ancho. Se usará un cortador helicoidal de 75 mm de diámetro con 10 dientes. Si el avance por diente es de 0.2 mm/diente y la velocidad de corte es de 0.75 m/s, calcule el tiempo de maquinado y la tasa de remoción de metal para eliminar 6 mm de la superficie de la pieza.

24.47 Explique si las marcas de avance dejadas en la pieza de trabajo por una fresa de refrentado (como se muestra en la figura 24.16a) son segmentos de círculos verdaderos. Describa los parámetros que considere para responder esta pregunta.

24.48 Para describir las operaciones de brochado y el diseño de las brochas, no se han dado ecuaciones sobre avances, velocidades ni tasas de remoción de material, como sí se hizo para el torneado y el fresado. Revise la figura 24.24 y desarrolle dichas ecuaciones.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

24.49 Las partes que se ilustran en la figura 24.1 se van a maquinar a partir de un material rectangular. Sugiera las máquinas herramientas requeridas, los arreglos de sujeción necesarios y los tipos y secuencia de las operaciones a realizar. Analice su respuesta en términos del material de la pieza de trabajo, como aluminio *versus* acero inoxidable.

24.50 ¿Preferiría usted maquinar la parte de la figura 24.1f a partir de un material preformado (de forma casi neta) en vez de uno rectangular? Si así fuera, ¿cómo prepararía dicho material?, ¿cómo influiría en su respuesta el número de partes requeridas?

24.51 Si se fueran a maquinar paneles expandidos de panal (vea la sección 16.12) en una operación de fresado de forma, ¿qué precauciones tomaría para evitar que el metal se distorsionara debido a las fuerzas de la herramienta? Piense en todas las soluciones posibles.

24.52 Suponga que usted es un profesor que cubre los temas de este capítulo y va a elaborar un cuestionario sobre los aspectos numéricos para probar la comprensión de sus estudian-

tes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

24.53 Sugiera métodos con los que fresas de distintos diseños (incluso de acabado) pueden incorporar insertos de carburo.

24.54 Prepare una tabla sintética de las capacidades de los procesos de maquinado descritos en este capítulo. En varias columnas, enumere las máquinas involucradas, los tipos de herramientas y sus materiales, formas de los materiales originales y de las partes producidas, tamaños máximo y mínimo comunes, acabado de la superficie, tolerancias dimensionales y tasas de producción.

24.55 Con base en los datos desarrollados en el problema 24.54, describa sus pensamientos acerca del procedimiento por seguir para determinar qué tipo de máquina herramienta seleccionar cuando se maquine una parte en particular.

24.56 Elabore una lista de todos los procesos que se pueden usar para manufacturar engranes, entre ellos los descritos en las partes II y III de este libro. Para cada proceso, describa las ventajas, limitaciones y calidad de los engranes producidos.

Centros de maquinado, estructuras de las máquinas herramienta y economía del maquinado

CAPÍTULO

25

- Este capítulo presenta las características, tipos y ventajas de los centros de maquinado, y el concepto de máquinas herramienta reconfigurables.
- Se hace énfasis en la importancia de entender el rendimiento de las máquinas herramienta, sus módulos y componentes, en particular con respecto a la rigidez, vibración, traqueteo y características de amortiguamiento. Éstas son consideraciones importantes no sólo para la calidad y exactitud dimensional, sino también por su influencia en la vida de la herramienta, así como en la productividad y economía de las operaciones de maquinado.
- Después se presentan el maquinado de alta velocidad, el maquinado de alta dureza y las operaciones de maquinado de ultraprecisión, temas que están muy relacionados con la economía del maquinado.
- El capítulo termina con un método simple de análisis del costo para determinar las condiciones en las que pueden seleccionarse los parámetros del maquinado, de modo que pueda minimizarse el costo de maquinado por pieza o el tiempo de maquinado por pieza.

25.1	Introducción	703
25.2	Centros de maquinado	703
25.3	Estructuras de máquinas herramienta	712
25.4	Vibración y traqueteo en las operaciones de maquinado	716
25.5	Maquinado de alta velocidad	719
25.6	Maquinado de alta dureza	720
25.7	Maquinado de ultraprecisión	721
25.8	Economía del maquinado	722

CASO DE ESTUDIO:

25.1	Maquinado de pistas exteriores para rodamientos en un centro de torneado	710
-------------	---	------------

25.1 Introducción

En los cuatro capítulos anteriores se han descrito las operaciones de maquinado y las máquinas herramienta, pero no se ha hecho énfasis en la muy difundida integración de la tecnología de cómputo avanzada y la flexibilidad que ello permea en las operaciones de manufactura. Las computadoras han mejorado de forma notable las capacidades de las máquinas herramienta, ya que ahora pueden producir con rapidez y en forma repetida geometrías de partes muy complejas. El programa que controla una máquina herramienta incorpora cambios en las condiciones de corte, compensa el desgaste de la herramienta, cambia automáticamente las herramientas y maquina una pieza de trabajo sin tener que cambiar el arreglo de sujeción o transferirla a otra máquina herramienta, como había sido la práctica durante muchos años.

Además de las tecnologías avanzadas de computación, ahora están muy desarrolladas las técnicas para evitar la vibración y el traqueteo, el maquinado de alta velocidad, el maquinado de alta dureza y el análisis avanzado de la economía del maquinado, todo lo cual ha revolucionado las operaciones de maquinado.

25.2 Centros de maquinado

Al describir los procesos de maquinado individuales y las máquinas herramienta en los capítulos anteriores, se observó que cada máquina, sin importar qué tanto esté automatizada, está diseñada para realizar básicamente el mismo tipo de operación, como el tor-

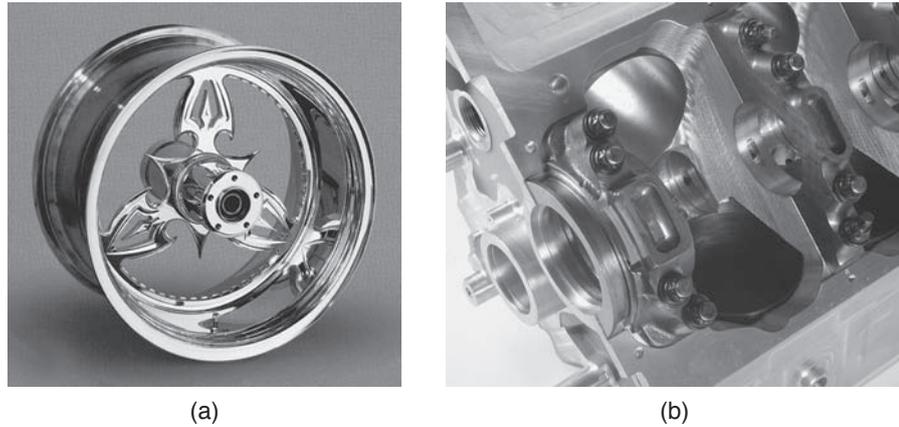


Figura 25.1 Ejemplos de partes que pueden maquinarse en centros de maquinado empleando diferentes procesos, como el torneado, refrentado, fresado, taladrado, mandrinado, brochado y roscado; en condiciones normales estas partes requerirían el uso de varias máquinas herramienta para fabricarse. (a) Rueda forjada de motocicleta, con maquinado final para cumplir la tolerancia y su posterior pulido y recubrimiento. (b) Vista detallada de un block de motor que muestra cavidades complejas, agujeros con rosca y superficies planas. *Fuente:* (a) Cortesía de R. C. Components; (b) cortesía de Donovan Engineering, programada por N. Woodruff y fotografía de E. Dellis, Powersports Photography.

neado, mandrinado, taladrado, fresado, brochado o cepillado. También se ha mostrado que la mayoría de partes manufacturadas con los métodos descritos en el libro requieren operaciones adicionales en sus distintas superficies antes de quedar terminadas. Por ejemplo, observe que las partes que aparecen en la figura 25.1 tienen varias características geométricas complejas y que todas sus superficies requieren un tipo diferente de operación de maquinado para cumplir con ciertos requerimientos específicos con respecto a sus formas, rasgos, tolerancias de dimensiones y acabado de la superficie. También tenga presentes las siguientes observaciones:

- Recuerde que existen varias posibilidades en la producción de *forma neta* o *forma casi neta* para estas partes, lo que depende de restricciones específicas en cuanto a las formas, tolerancias dimensionales, características detalladas de la superficie, acabado superficial y varias propiedades adicionales mecánicas y de otro tipo con el fin de cumplir con los requerimientos de servicio. Los procesos de formado que son candidatos para dichas partes son el fundido de precisión, metalurgia de polvos, moldeo por inyección de polvos y forjado de precisión. Sin embargo, incluso así es muy probable que las partes requieran algunas operaciones adicionales de acabado. Por ejemplo, requerirán operaciones adicionales de maquinado las siguientes piezas: barrenos profundos de diámetro pequeño, barrenos roscados, superficies planas selladas con juntas, partes con tolerancias dimensionales muy estrictas, esquinas y bordes afilados y superficies planas o curvadas con diferentes requerimientos de acabado superficial.
- Si se requiriera cierto maquinado, o si se demuestra que es más económico maquinar estas partes hasta sus formas finales, entonces es obvio que ninguna de las máquinas herramienta descritas en los capítulos 23 y 24 podrían producir las partes *individual* y *completamente*. También observe que, tradicionalmente, las operaciones de maquinado se llevan a cabo mediante el traslado de la pieza de trabajo de una máquina herramienta a otra hasta terminar todas las operaciones requeridas de maquinado.

El concepto de centros de maquinado. El método tradicional de maquinar partes por medio de diferentes tipos de máquinas herramienta ha sido, y sigue siendo, un método viable de manufactura. Este método puede automatizarse mucho con el fin de incrementar la productividad y, en realidad, es el principio tras las **líneas de transfe-**

rencia, también llamadas *líneas de manufactura especializada* (DML, por sus siglas en inglés), como se describe en la sección 37.2.4. Las líneas de transferencia son de uso común en la *producción de grandes volúmenes* o en la *producción en masa*, consisten en varias máquinas herramienta específicas (especializadas) dispuestas en una secuencia lógica. La pieza de trabajo, como el block de un motor automotriz, se pasa de una estación a otra y en cada estación se realiza una operación específica de maquinado, después de lo cual se transfiere a la siguiente máquina para ejecutar otras operaciones de maquinado.

Sin embargo, hay situaciones en las que las líneas de transferencia no resultan factibles o económicas, en particular cuando los tipos de productos a procesar cambian con rapidez debido a factores como la demanda del producto o cambios en su forma o estilo. Es muy costoso y demanda mucho tiempo reacomodar estas máquinas herramienta para que respondan a las necesidades del siguiente y distinto ciclo de producción. Un concepto importante que se aboca a la flexibilidad en la manufactura, desarrollado a fines de la década de 1950, es el de **centros de maquinado**.

Un centro de maquinado (figura 25.2) es una máquina herramienta avanzada controlada por computadora que es capaz de realizar varias operaciones de maquinado, en diferentes superficies y con distintas orientaciones de la pieza de trabajo, sin tener que retirarla de su dispositivo o arreglo de sujeción. La pieza de trabajo por lo general es estacionaria, son las herramientas de corte las que giran, como lo hacen en operaciones de fresado, taladrado, asentado y machuelado. En tanto que en las líneas de transferencia en los talleres y fábricas tradicionales la pieza de trabajo se lleva *a la máquina*, en los centros de maquinado la operación es la que se lleva *a la pieza de trabajo*.

El desarrollo de los centros de maquinado se relaciona estrechamente con los avances en la automatización y el control por computadora de las máquinas herramienta, detalles de lo cual se describen en el capítulo 37. Como un ejemplo de los avances en los tornos modernos, recuerde que en la figura 23.10 se ilustra un torno de control numérico (**centro de torneado**), con dos torretas, cada una de las cuales porta varias herramientas de corte.

Componentes de un centro de maquinado. En un centro de maquinado, la pieza de trabajo se coloca en una tarima, o *módulo*, que puede moverse y girar (orientarse) en varias direcciones (figura 25.3). Una vez terminada una operación particular de maquinado, comienza otra que tal vez requiera volver a indexar la pieza de trabajo en su tarima. Ya que han finalizado todas las operaciones de maquinado, la tarima se retira automáticamente con la parte terminada y otra tarima, que lleva otra pieza de trabajo o varias de ellas para

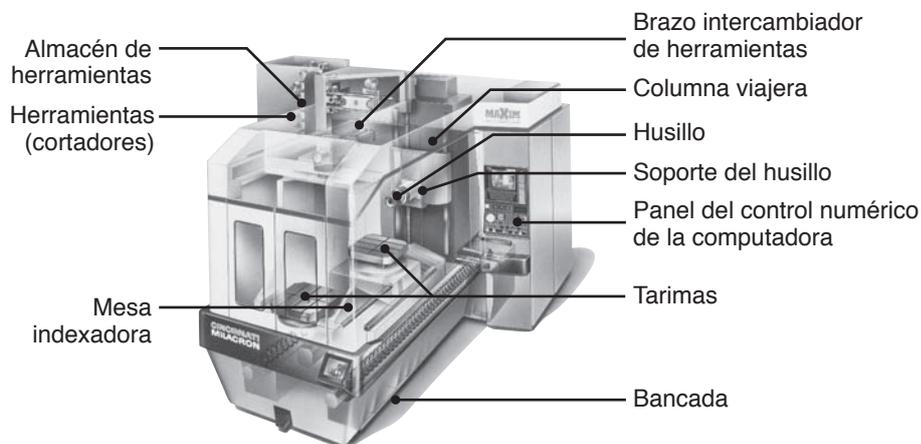


FIGURA 25.2 Centro de maquinado de husillo horizontal equipado con un cambiador automático de herramientas; los cargadores de herramientas pueden almacenar hasta 200 herramientas de distintas funciones y tamaños. *Fuente:* Cortesía de Cincinnati Milacron.

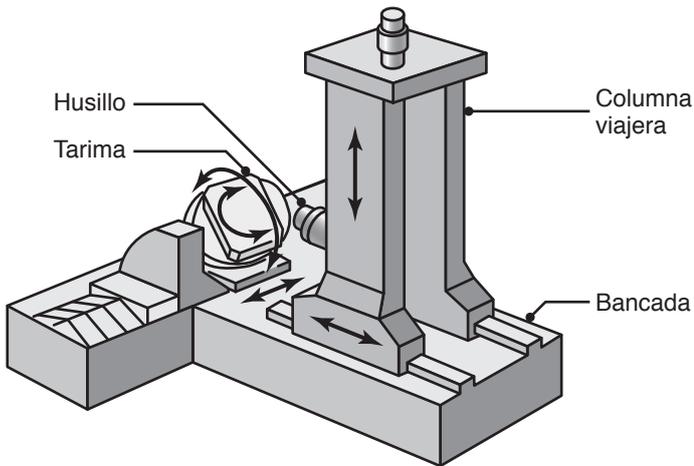


FIGURA 25.3 Ilustración esquemática del principio de un centro de maquinado de cinco ejes. Observe que además de poseer tres movimientos lineales (tres ejes), la tarima, que porta la pieza de trabajo, puede girar alrededor de dos ejes (lo que hace un total de cinco ejes), y permite así el maquinado de formas complejas como las que se ilustran en la figura 25.1. Fuente: Cortesía de Toyoda Machinery.

ser maquinadas, es colocada en posición por un **cambiador automático de tarimas** (figura 25.4). Todos los movimientos son controlados por una computadora, con ciclos de tiempo para cambiar tarimas del orden de sólo 10 a 30 segundos. Existen estaciones de tarimas con varias de ellas destinadas a un centro de maquinado. Las máquinas también pueden equiparse con distintas características automáticas, como es el caso de dispositivos para cargar y descargar partes.

Un centro de maquinado está equipado con un **cambiador de herramientas automático** (ATC, por sus siglas en inglés) programable. En función del diseño particular, se pueden almacenar en un cargador, tambor o cadena (*almacén de herramientas*) hasta 100 herramientas cortadoras. En ciertos centros de maquinado especiales y grandes, también existe un almacenamiento *auxiliar* de herramientas, lo que eleva la capacidad a 200. Las herramientas de corte se seleccionan automáticamente por la ruta más corta al husillo de la máquina. Las dimensiones máximas que las herramientas de corte pueden alcanzar alrededor de una pieza de trabajo en un centro de maquinado se conocen como **envolvente de trabajo** (volumen de trabajo), término que se usó originalmente en relación con los robots industriales, como se describe en la sección 37.6.

En la figura 25.5 se muestra un **brazo cambiador de herramientas** de diseño común; éste gira para tomar una herramienta en particular y colocarla en el husillo; observe que cada herramienta tiene su propio sujetador, lo que hace muy eficiente la transferencia de ellas al husillo de la máquina. Las herramientas se identifican con código de barras, códigos QR, o con etiquetas adheridas directamente a sus sujetadores. Es común que los tiempos para cambiar herramientas estén entre 5 y 10 segundos, pero puede ser de hasta 30 segundos para herramientas que llegan a pesar 110 kg (250 lb) y menos de un segundo para las pequeñas.

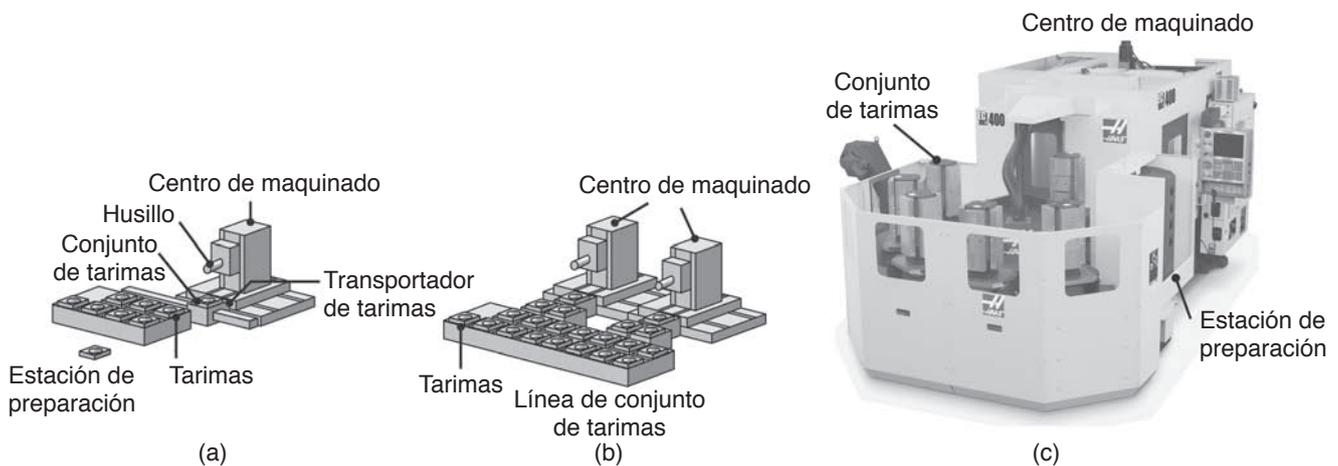


FIGURA 25.4 (a) Ilustración esquemática de la vista superior de un centro de maquinado de husillo horizontal; se aprecian el conjunto de tarimas, la estación de preparación de una tarima, el transportador de tarimas y una tarima activa en operación (directamente debajo del husillo de la máquina). (b) Ilustración esquemática de dos centros de maquinado con un conjunto común de tarimas. (c) Conjunto de tarimas para un centro de maquinado de husillo horizontal; en tales sistemas son posibles otras disposiciones de las tarimas. Fuente: (a) y (b) Cortesía de Hitachi Seiki Co., Ltd.; (c) Cortesía de Haas Automation, Inc.

Los centros de maquinado pueden estar equipados con una estación de prueba de herramientas y/o una estación de prueba de partes, la cual envía información al sistema de control de la máquina de modo que éste pueda compensar cualesquiera variaciones en las especificaciones de la herramienta o en su desgaste. Pueden instalarse sensores de contacto (palpadores) (figura 25.6) en un portaherramientas con el fin de determinar las superficies de referencia de la pieza de trabajo para seleccionar las especificaciones de la herramienta y para la inspección en línea de las partes que se maquinan.

En la figura 25.6, observe que se pueden contactar varias superficies (vea también *tecnología de sensores*, sección 37.7) y que sus posiciones relativas se determinan y almacenan en la base de datos del software de la computadora. Los datos se usan después para programar las trayectorias de la herramienta (vea, por ejemplo, la figura 37.12) y para compensar su longitud, diámetro y desgaste en máquinas herramienta más avanzadas. También pueden usarse sensores sin contacto para medir dimensiones, rugosidad de la superficie o temperatura.

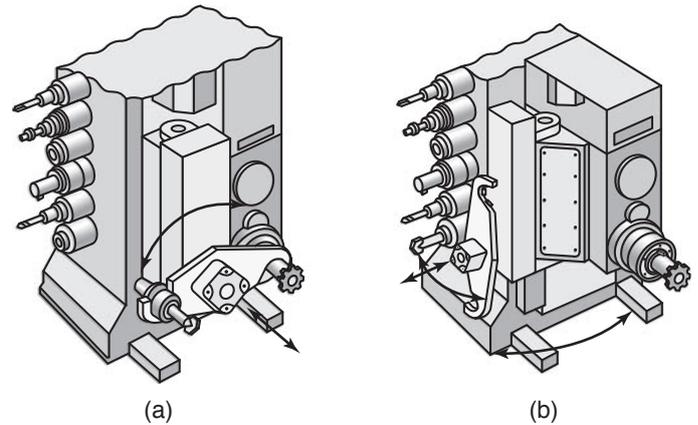


FIGURA 25.5 Cambiador basculante de herramientas en un centro de maquinado de husillo horizontal. (a) El brazo cambiador de herramientas está colocando un portaherramientas con un cortador en el husillo de la máquina; note el movimiento axial y de rotación del brazo. (b) El brazo regresa a su posición inicial; observe su rotación con respecto a su eje vertical después de que colocó la herramienta y los dos grados de libertad en su posición inicial.

25.2.1 Tipos de centros de maquinado

Hay varios diseños para los centros de maquinado. Los dos tipos básicos son los de husillo vertical y los de husillo horizontal, aunque muchas máquinas tienen la capacidad de operar en ambos ejes.

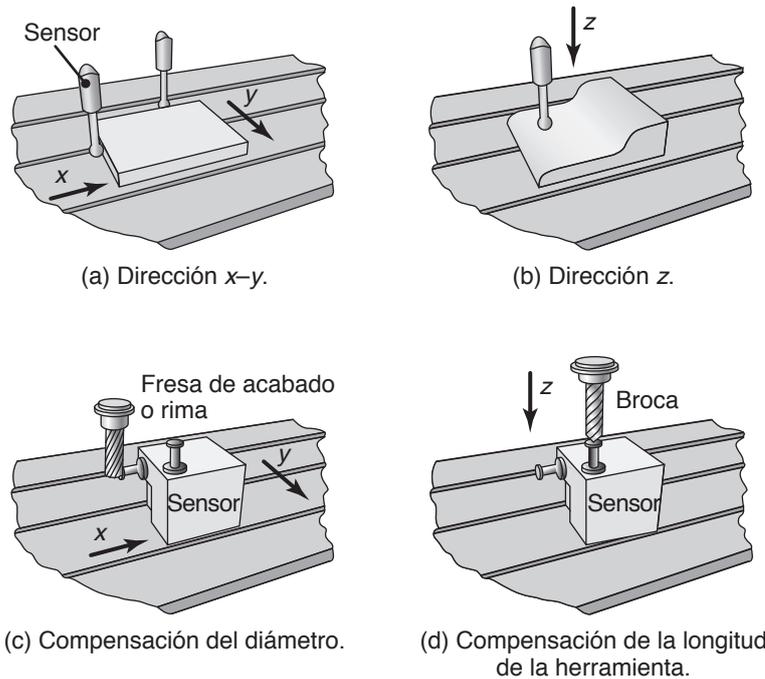


Figura 25.6 Sensores de contacto que se usan en los centros de maquinado para determinar las posiciones y superficies de la pieza de trabajo y la herramienta, en relación con la mesa o la columna de la máquina. Sensor de contacto que determina (a) la posición x-y (horizontal) de una pieza de trabajo; (b) la altura de una superficie horizontal; (c) la posición plana de la superficie de un cortador (es decir, para la compensación del diámetro del cortador) y (d) la longitud de una herramienta para compensarla.

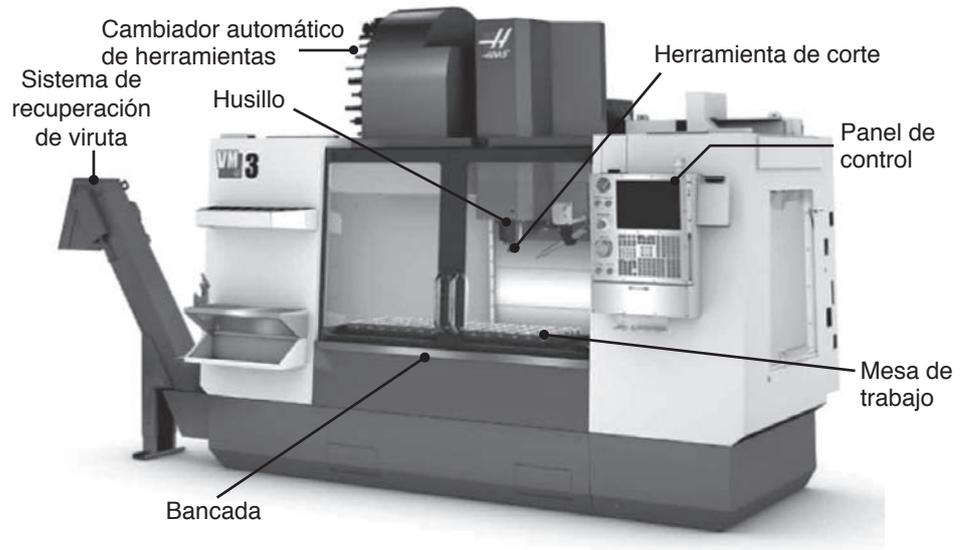


FIGURA 25.7 Centro de maquinado de husillo vertical; el cambiador de herramientas está a la izquierda de la máquina y tiene un cargador de 40 herramientas. *Fuente:* Cortesía de Haas Automation, Inc.

Centros de maquinado de husillo vertical. También conocidas como *centros de maquinado verticales* (VMC, por sus siglas en inglés), estas máquinas son capaces de realizar varias operaciones de maquinado en partes con cavidades profundas, como se requiere en la fabricación de un molde o dado (proceso también conocido como *tallado de dados*). En la figura 25.7 se muestra un centro de maquinado de husillo vertical, que es semejante a una fresadora de husillo vertical. El cargador de herramientas está a la izquierda de la máquina y todas las operaciones y movimientos se dirigen y modifican por medio del panel de control de la computadora, ubicado a la derecha. Debido a que en el maquinado vertical las fuerzas de empuje están dirigidas hacia abajo, tales máquinas tienen mucha rigidez y por ello producen partes con buena exactitud dimensional. Los VMC por lo general son menos caros que las máquinas de huso horizontal de capacidad similar.

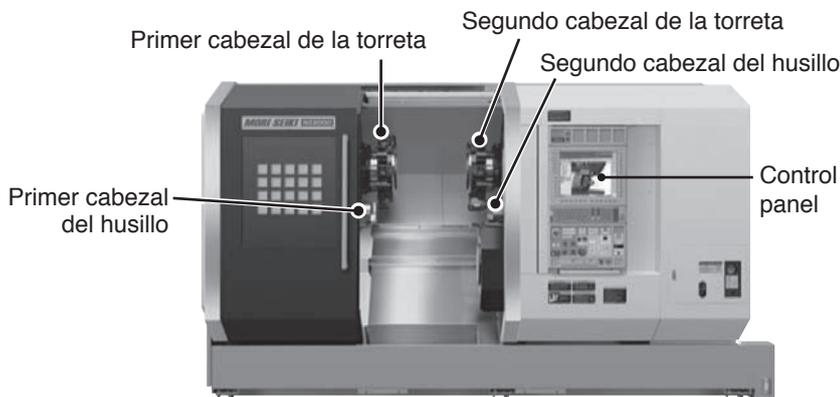


FIGURA 25.8 Centro de torneado de control numérico computarizado. Los dos cabezales de los husillos y las torretas hacen que la máquina sea muy flexible en sus capacidades de maquinado, hay en el mercado cabezales de hasta tres torretas. *Fuente:* Cortesía de Mori Seiki Co., Ltd.

Centros de maquinado de husillo horizontal. También conocidos como *centros de maquinado horizontales* (HMC, por sus siglas en inglés), estas máquinas son apropiadas para piezas de trabajo grandes y altas que requieren ser maquinadas en varias de sus superficies. La tarima puede ser girada en diferentes ejes (vea la figura 25.3) a varias posiciones angulares.

Centros de torneado. Ésta es otra categoría de máquinas de husillo horizontal, y son básicamente *tornos* controlados por computadora con varias características. En la figura 25.8 se presenta un centro de girado de múltiples torretas. Está construido con dos husillos horizontales y dos torretas, equipada con varias herramientas de corte que

se usan para realizar distintas operaciones en una pieza de trabajo que gira. Las torretas pueden estar impulsadas para permitir operaciones de taladrado o fresado dentro del centro de torneado de control numérico computarizado, sin la necesidad de reacomodar la pieza de trabajo. Por esta razón, es frecuente que tales máquinas se conozcan como centros CNC de fresado-torneado.

Centros de maquinado universal. Estas máquinas están equipadas con husillos tanto verticales como horizontales. Tienen diversas características y son capaces de maquinar simultáneamente todas las superficies de una pieza de trabajo, es decir en forma vertical, horizontal y en varios ángulos.

25.2.2 Características y capacidades de los centros de maquinado

A continuación se resumen las principales características de los centros de maquinado:

- Son capaces de manejar una amplia variedad de tamaños y formas de piezas con eficiencia, de manera económica y repetida, y con gran exactitud dimensional y tolerancias del orden de ± 0.0025 mm (0.0001 pulg).
- Son versátiles y capaces de cambiar con rapidez de un tipo de producto a otro.
- Se reduce el tiempo requerido para cargar y descargar las piezas de trabajo, cambiar herramientas, calibrar la parte que se maquina y resolver los problemas. Debido a la flexibilidad inherente de los centros de maquinado, la pieza de trabajo podría no necesitar cambiar de arreglo de sujeción durante el trabajo, lo que se conoce como método de *terminado en una pasada*. Mejora la productividad, se reducen los requerimientos de mano de obra (en particular la especializada) y se minimizan los costos de producción.
- Estas máquinas pueden equiparse con dispositivos que vigilen la condición de la herramienta para detectar su astillado y desgaste, así como con sensores para compensar su desgaste y posicionamiento.
- Ahora los centros de maquinado tienen características para la medición e inspección de las piezas de trabajo en proceso y después de éste.
- Estas máquinas son relativamente compactas, muy automatizadas y tienen sistemas avanzados de control, por lo que un operador puede atender dos o más centros de maquinado al mismo tiempo, lo que reduce los costos de la mano de obra.

Debido a la alta productividad de los centros de maquinado, se producen grandes cantidades de viruta que deben colectarse y eliminarse adecuadamente (*administración de la viruta*, sección 23.3.7). Existen varios diseños de sistemas para recolectar la viruta, con una o más bandas transportadoras de cadena o en espiral (tornillo) las cuales colectan las virutas que produce la máquina y las llevan a un punto de recolección (vea la figura 25.7).

Hay centros de maquinado de varios tamaños y tipos. Las capacidades más comunes llegan a ser de 75 kW (100 hp). Las velocidades máximas del husillo por lo general están en el rango de 4000 a 8000 rpm, y algunas son de hasta 75 000 rpm para aplicaciones especiales que usan cortadores de diámetro pequeño. Los husillos modernos aceleran a una velocidad de 20 000 rpm en sólo 1.5 segundos. Algunas tarimas son capaces de soportar piezas de trabajo que pesan hasta 7000 kg (15 000 lb), aunque hay de mayor capacidad para aplicaciones especiales. El costo de los centros de maquinado va desde 50 000 hasta 1 millón de dólares estadounidenses o más.

25.2.3 Selección de los centros de maquinado

Por lo general los centros de maquinado requieren un importante gasto de capital; para que sean rentables tienen que operarse más de un turno por día. En consecuencia, debe

haber una demanda suficiente y continua de piezas que justifique su compra. Sin embargo, por su versatilidad inherente, los centros de maquinado se usan para producir un amplio rango de productos, en particular para la *personalización masiva* o la *manufactura justo a tiempo*, como se describe en la sección 39.5.

La selección del tipo y tamaño de los centros de maquinado depende de varios factores, en especial los siguientes:

- Tipo de productos, tamaño y complejidad de su forma.
- Tipo de operaciones de maquinado a realizar y cantidad de herramientas de corte requeridas.
- Exactitud dimensional especificada.
- Tasa de producción requerida.

CASO DE ESTUDIO 25.1 Maquinado de pistas exteriores para rodamientos en un centro de torneado

Las pistas exteriores de los baleros (figura 25.9) se maquinan en un centro de torneado. El material de inicio es un tubo de acero rodado en caliente, 52100, con diámetro exterior de 91 mm (3.592 pulg) y 75.5 mm (2.976 pulg) de diámetro interior. La velocidad de corte es de 95 m/min (313 pies/min) para todas las operaciones. Todas las herramientas son de carburo, inclusive el tronizador (usado en la última operación ilustrada), que es de 3.18 mm ($\frac{1}{8}$ pulg), en lugar de los 4.76 mm ($\frac{3}{16}$ pulg) del buril de acero de alta velocidad que se usó primero.

La cantidad de material ahorrado con este cambio es significativa, ya que el ancho de la cavidad es pequeño. El centro de torneado fue capaz de maquinar las cavidades a altas velocidades y con tolerancias repetibles de ± 0.025 mm (0.001 pulg); vea también el ejemplo 23.2.

Fuente: Basado en datos de McGill Manufacturing Company.

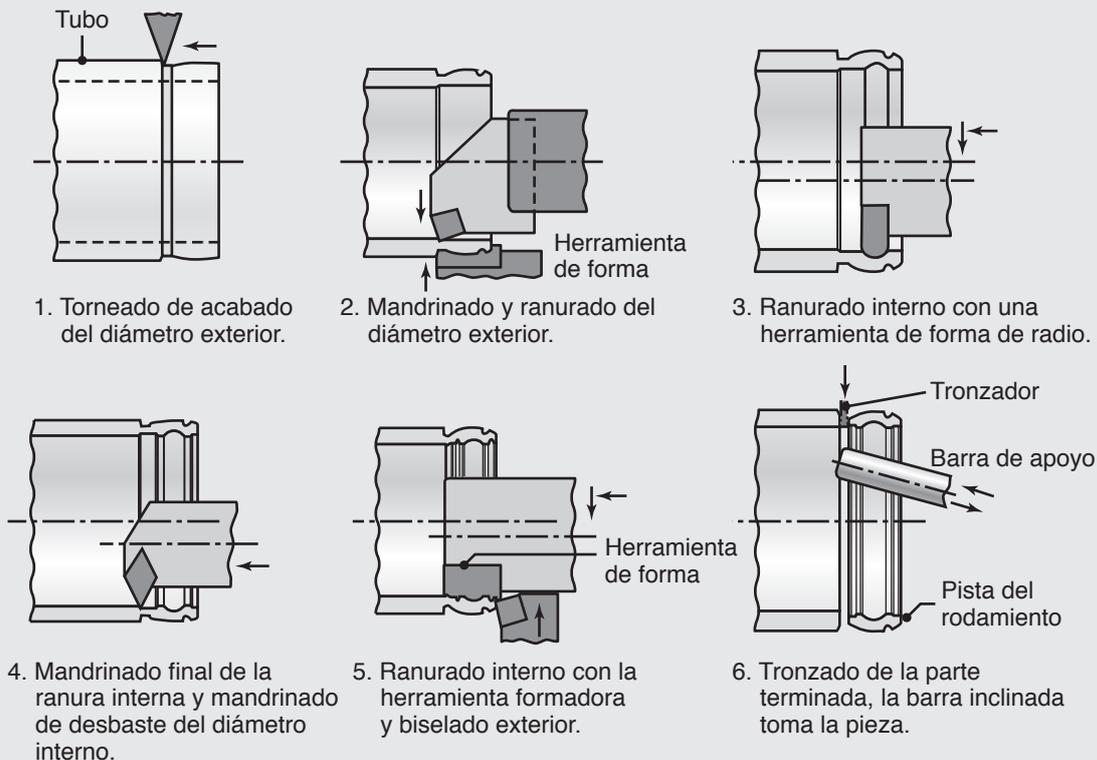


FIGURA 25.9 Pasos en el maquinado de pistas exteriores para rodamientos.

25.2.4 Máquinas y sistemas reconfigurables

La necesidad de tener flexibilidad en los procesos de manufactura ha llevado al concepto más nuevo de *máquinas reconfigurables*, que constan de varios módulos. El término reconfigurable proviene del hecho de que con el uso de hardware de computación avanzado y controladores reconfigurables, y el uso de los avances en las tecnologías de administración de la información, los componentes de la máquina se pueden disponer una y otra vez con rapidez en varias configuraciones con el fin de cumplir con demandas específicas de producción.

La figura 25.10 muestra un ejemplo de cómo puede reconfigurarse la estructura básica de un centro de maquinado de tres ejes para convertirlo en un centro de maquinado *modular*. Con tal flexibilidad, la máquina puede ejecutar diferentes operaciones de maquinado mientras recibe varios tamaños y geometrías de la pieza de trabajo y otras partes. Otro ejemplo se da en la figura 25.11, donde una máquina de cinco ejes (tres movimientos lineales y dos rotacionales) se puede reconfigurar ensamblando diferentes módulos.

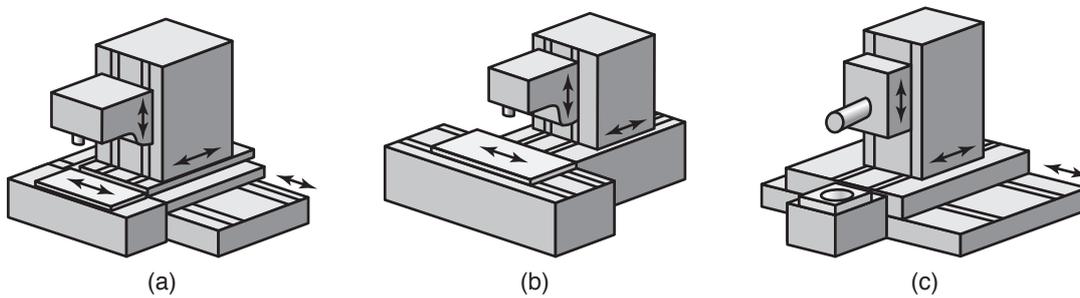


FIGURA 25.10 Ilustración esquemática de un centro de maquinado modular reconfigurable capaz de recibir piezas de trabajo de diferentes formas y tamaños, y que requieren distintas operaciones de maquinado en sus distintas superficies. Fuente: Tomado de Y. Koren.

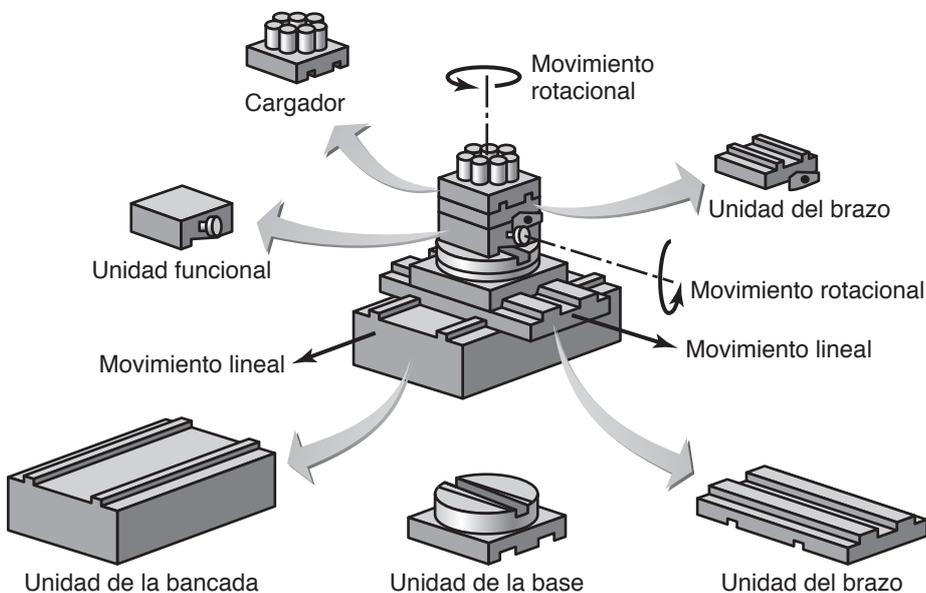


FIGURA 25.11 Ilustración esquemática del ensamblado de los distintos componentes de un centro de maquinado reconfigurable. Fuente: Tomado de Y. Koren.

Las máquinas reconfigurables prometen (a) mejorar la productividad y eficiencia de las operaciones de manufactura; (b) reducir el tiempo necesario para la producción y (c) dar una respuesta rápida y rentable a las demandas del mercado (vea también el capítulo 39). Estas capacidades son significativas, en especial a la vista de la introducción frecuente de nuevos productos en un mercado global muy competido, las fluctuaciones en la demanda y mezcla de los productos y las modificaciones impredecibles en el diseño del producto.

25.3 Estructuras de máquinas herramienta

Esta sección describe los aspectos de materiales y diseño de las estructuras de las máquinas herramienta que son importantes en la producción de partes con características geométricas, dimensionales y de acabado superficial aceptable.

25.3.1 Materiales

La siguiente es una lista de los materiales de uso común o que son adecuados para las estructuras de las máquinas herramienta:

- **Hierro fundido gris** Fue el primer material que se usó en las estructuras de las máquinas herramienta y tiene las ventajas de tener una buena capacidad de amortiguamiento y bajo costo, aunque su desventaja es la de ser muy pesado. La mayor parte de las estructuras de máquinas herramienta están hechas con hierro fundido de clase 40; algunas son de clase 50 (vea la tabla 12.4).
- **Estructuras de acero soldadas** (vea los capítulos 30 y 31) Son más ligeras que las de hierro fundido. Los aceros forjados, de uso común en estas estructuras, (a) existen en una amplia gama de tamaños y formas de sección, como canales, ángulos y tubos; (b) tienen buenas propiedades mecánicas; (c) poseen buenas características de manufactura, como facilidad para formarlos, maquiñarlos y soldarlos, y (d) son de bajo costo. Las estructuras hechas de acero tienen razones elevadas de rigidez a peso porque usan secciones transversales como tubos y canales; sin embargo, en contraste, su capacidad de amortiguamiento es muy baja.
- **Componentes de cerámicos** (capítulos 8 y 18) Se utilizan en máquinas herramienta avanzadas por su resistencia, rigidez, resistencia a la corrosión, acabado superficial y estabilidad térmica. Los componentes de cerámicos se introdujeron por primera vez en la década de 1980. Ahora es posible fabricar husillos y rodamientos de nitruro de silicio, los cuales tienen mejores características de fricción y desgaste que los materiales metálicos tradicionales. Además, su baja densidad los hace adecuados como componentes de maquinaria de alta velocidad con movimientos rápidos recíprocos o rotatorios, en los que son deseables fuerzas inerciales bajas con el fin de mantener la estabilidad del sistema, reducir las fuerzas de inercia y con ello disminuir el tiempo sin corte en las operaciones de maquinado de alta velocidad.
- **Compósitos** (capítulo 9) Pueden ser una matriz de polímero, metal o cerámicos, con diferentes materiales de refuerzo. Las composiciones pueden hacerse a la medida para que brinden propiedades mecánicas adecuadas en los ejes seleccionados de la máquina herramienta. Aunque hoy son muy caros, es probable que los compósitos se conviertan en materiales significativos para aplicaciones de maquinado de mucha exactitud y alta velocidad.
- **Compósitos de granito-epóxico** Constan de una composición normal de 93% de granito triturado y 7% de un aglutinante epóxico; se usaron por primera vez en esmeriles de precisión y esmeriles internos a principios de la década de 1980 (vea la sección 26.4). Estos materiales compuestos tienen varias propiedades favorables: (a) facilidad de fundición, lo que permite versatilidad en el diseño de máquinas herramienta; (b) razón elevada de rigidez a peso; (c) estabilidad térmica; (d) resistencia a la degradación ambiental, y (e) buena capacidad de amortiguamiento.

- **Concreto polimérico** Mezcla de concreto triturado y plástico (comúnmente polimetilmetacrilato) y se funde con facilidad en las formas deseadas para hacer bases de máquinas y otros componentes. Aunque tiene poca rigidez (alrededor de un tercio del hierro fundido de clase 40) y baja conductividad térmica, el concreto de polímero tiene buena capacidad de amortiguamiento y también se puede usar para la construcción de emparedados con hierros fundidos, con lo que se combinan las ventajas de cada tipo de material. Puede usarse concreto simple en las estructuras de máquinas herramienta de hierro fundido para incrementar su masa y mejorar su capacidad de amortiguamiento. Otro medio que ha demostrado ser efectivo para mejorar dicha capacidad es llenar las cavidades de las bases de las máquinas con arena suelta.

25.3.2 Consideraciones de diseño de las máquinas herramienta

Por lo general las consideraciones importantes en las máquinas herramienta se refieren a los factores siguientes:

- Diseño, materiales y construcción.
- Materiales del husillo y tipo de construcción.
- Distorsión térmica de los componentes de la máquina.
- Compensación de errores y control de los componentes del movimiento a lo largo de los rieles.

Rigidez. La rigidez, que es un factor de importancia para la exactitud dimensional de una máquina herramienta, es una función de (a) el módulo de elasticidad de los materiales usados y (b) la geometría de los componentes estructurales, entre ellos el husillo, rodamientos, carro y rieles. La rigidez de la máquina aumenta con las mejoras en el diseño, como el uso de costillas interiores con arreglo diagonal.

Amortiguamiento. Éste es un factor crítico para reducir o eliminar la vibración y el traqueteo en las operaciones de maquinado. Involucra principalmente (a) los tipos de materiales usados y (b) el tipo y número de puntos de unión (soldaduras *versus* remaches) en la estructura de la máquina. Los hierros fundidos y los compuestos de matriz de polímero tienen mucha mejor capacidad de amortiguamiento que los metales o cerámicos; asimismo, a mayor cantidad de uniones en una estructura de máquina, más amortiguamiento habrá.

Distorsión térmica. Un factor importante en las máquinas herramienta es la distorsión térmica de sus componentes, lo que contribuye de manera significativa a su falta de precisión.

En las máquinas herramienta hay dos fuentes de calor:

1. *Fuentes internas*, como son los rodamientos, tornillos sin fin de bolas, carros de la máquina, motores del husillo, bombas y servomecanismos, así como la zona de corte durante el maquinado (sección 21.4).
2. *Fuentes externas*, como los fluidos de corte, hornos cercanos, calentadores, otras máquinas vecinas, luz solar y fluctuaciones en la temperatura ambiente de fuentes como unidades de aire acondicionado, respiraderos o incluso alguna puerta o ventana que se abra o cierre.

Estas consideraciones son significativas, en particular en el **maquinado de precisión** y **ultraprecisión** (sección 25.7), donde las tolerancias dimensionales y el acabado de la superficie están en el rango de nanómetros. Las máquinas herramienta usadas para estas aplicaciones están equipadas con las siguientes características:

- Varias maneras de compensar en tiempo real el error térmico y geométrico, como (a) el modelado del calor y el enfriamiento y (b) la compensación electrónica de posición exacta de los tornillos sin fin de bolas.

- Rodamientos de gas o fluido hidrostático en el husillo, lo que permite que las herramientas realicen con más facilidad movimientos precisos sin encontrar demasiada fricción o fenómenos de adherencia y deslizamiento (sección 33.4).
- Nuevos diseños de los mecanismos de tracción o fricción para un movimiento lineal más suave.
- Controles de avance y posición extremadamente finos por medio de microactuadores.
- Canales para la circulación de fluido en la base de la máquina herramienta para mantener la estabilidad térmica.

Los componentes estructurales de la máquina herramienta pueden fabricarse de materiales con mucha estabilidad dimensional y bajo coeficiente de expansión térmica, como Super-Invar (sección 3.6), granito, cerámicos y compósitos. También es viable la opción de *rediseño* para mejorar el rendimiento de máquinas antiguas.

Técnicas de ensamblado para los componentes de la máquina herramienta. Tradicionalmente, los componentes de una máquina herramienta se han ensamblado con abrazaderas roscadas y por soldadura (parte VI). Hoy día, las técnicas de ensamblado avanzado incluyen la fundición integral y la adhesión con resinas. Los rieles de acero, con su elevada rigidez, pueden fundirse del todo sobre una cama de hierro fundido empleando una tecnología de fundición híbrida. La *adhesión con resinas* se emplea para ensamblar máquinas herramienta, lo que sustituye las abrazaderas mecánicas. Los adhesivos, descritos en la sección 32.4, tienen características favorables para la construcción de máquinas herramienta ya que no requieren una preparación especial y son adecuados para ensamblar componentes tanto metálicos como no metálicos de las máquinas.

Rieles. Tradicionalmente, la preparación de los rieles de las máquinas herramienta ha requerido un gran esfuerzo. Los de hierro fundido simple, que es el material más común, requieren mucho cuidado para lograr la precisión y vida de servicio requeridas. Por lo general, los movimientos de los distintos componentes de una máquina herramienta, en sus diferentes ejes, han utilizado tornillos sin fin de bolas de alta precisión, *tornillos rotatorios* y *motores rotatorios*. Este sistema de componentes mecánicos y eléctricos tiene varias características inevitables en su diseño, como limitaciones de velocidad, restricciones en la longitud, efectos de la inercia, holgura en los engranes y otros errores, desgaste de los componentes y baja eficiencia. Los controles modernos compensan estas características con el fin de lograr más precisión, como ya se mencionó.

Unidades de motores lineales. Un *motor lineal* es como un motor eléctrico rotatorio normal que se hubiera aplanado (abierto). Es el mismo principio que se aplica en ciertos sistemas terrestres de alta velocidad en los cuales los vagones levitan por medio de fuerzas magnéticas (Maglev). En dichas unidades, las superficies deslizantes están separadas por aire y, en consecuencia, tienen muy poca fricción y pérdida de energía.

Los motores lineales de las máquinas herramienta tienen ventajas importantes:

- Sencillez y mantenimiento mínimo, puesto que hay una parte móvil sin uniones mecánicas.
- Operación suave, mayor exactitud en el posicionamiento y susceptible de repetición, en rangos tan bajos como los de fracciones de micras.
- Un amplio rango de velocidades lineales, de 1 $\mu\text{m/s}$ a 5 m/s.
- Tasas de aceleración alrededor de 1 a 2 g (10 a 20 m/s^2), y de hasta 4 a 10 g para unidades pequeñas.
- Los componentes móviles no sufren ningún desgaste, puesto que no hay contacto físico entre las superficies deslizantes de la máquina.

Cimientos de la máquina. Los materiales de los cimientos, su masa y la manera en que se instalan en una planta son consideraciones importantes, ya que ayudan a

reducir la vibración y no perjudican el rendimiento de la maquinaria cercana en la planta. Por ejemplo, en la instalación de una rectificadora especial para rebajar con alta precisión engranes de propulsión marina de 2.75 m (9 pies) de diámetro, los cimientos de concreto tenían una profundidad de 6.7 m (22 pies). Su gran masa, en combinación con la base de la máquina, redujo la amplitud de las vibraciones. Se obtienen resultados aún mejores cuando se instala una máquina en una losa de concreto *independiente*, es decir aislada del resto del piso de la planta por medio de dispositivos aislantes de impactos.

25.3.3 Máquinas hexápodos

Los desarrollos en el diseño y los materiales usados en las estructuras de las máquinas herramienta y sus distintos componentes tienen lugar en forma continua, con los propósitos de (a) dar flexibilidad al maquinado; (b) incrementar su envolvente de maquinado (el espacio dentro del que puede llevarse a cabo el maquinado) y (c) hacerlos más ligeros. Una estructura de máquina herramienta verdaderamente innovadora es un marco autocontenido en forma de octaedro (ocho lados).

Se les conoce como **hexápodos** (figura 25.12) o *máquinas cinemáticas paralelas unidas*, pues tienen un diseño basado en un mecanismo llamado *plataforma Stewart* (por D. Stewart) desarrollado en 1966 y usado primero para posicionar simuladores de cabinas de aeronaves. La ventaja principal de este sistema es que las uniones en el hexápodo están cargadas axialmente, por lo que las fuerzas de flexión y doblamientos laterales son mínimos y da como resultado una estructura muy rígida.

La pieza de trabajo se monta en una mesa estacionaria. Se usan tres pares de *tubos telescópicos* (llamados *puntales* o *piernas*), cada uno con su propio motor y equipado con tornillos de bola, para maniobrar un portaherramientas giratorio. Mientras que se maquilan varias características y superficies curvadas, el controlador acorta de manera automática unos tubos y extiende otros, de modo que el cortador sigue una trayectoria especificada en torno a la pieza de trabajo. En estas máquinas están involucrados seis conjuntos de coordenadas (de ahí el término *hexápodo* que significa “seis pies”): tres conjuntos lineales y tres rotacionales. Cada movimiento del cortador, incluso uno lineal simple, es traducido a las seis coordenadas de las longitudes de las

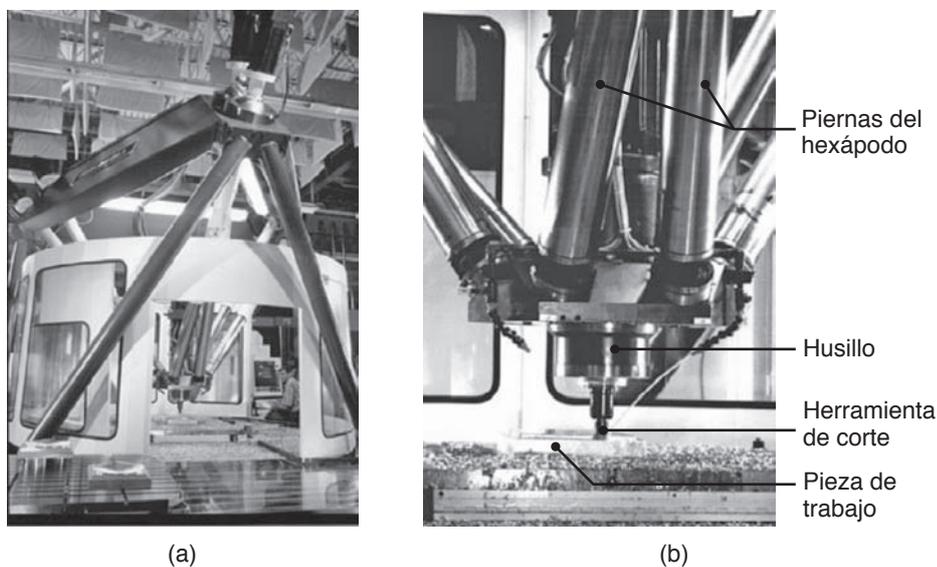


FIGURA 25.12 (a) Máquina herramienta hexápoda, donde se muestran sus componentes principales. (b) Vista detallada de la herramienta de corte en un centro de maquinado hexápodo. Fuente: Cortesía de National Institute of Standards and Technology.

patas con el movimiento en tiempo real. Los movimientos de las patas son rápidos; en consecuencia, se generan grandes aceleraciones y desaceleraciones que provocan fuerzas inerciales.

Estas máquinas (a) tienen mucha rigidez; (b) no son tan masivas como los centros de maquinado; (c) tienen alrededor de un tercio menos de partes que los centros de maquinado; (d) tienen una gran envolvente de maquinado (y por ello más acceso a la zona de trabajo); (e) son capaces de mantener la herramienta de corte perpendicular a la superficie que se maquina (lo que mejora la operación) y (f) tienen mucha flexibilidad (con seis grados de libertad) en la producción de partes con diferentes geometrías y tamaños, sin necesidad de volver a preparar el trabajo en curso. A diferencia de la mayoría de máquinas herramienta, éstas son básicamente portátiles; en realidad ahora se dispone de *accesorios hexápodos* que permiten que un centro de maquinado convencional se convierta con facilidad en una máquina hexápoda.

Se ha construido un número limitado de máquinas hexápodos. En vista de su potencial como máquinas herramienta eficientes, se evalúa continuamente su rendimiento con respecto a su rigidez, distorsión térmica, fricción con los puntales, exactitud dimensional, velocidad de operación, posibilidad de repeticiones y confiabilidad.

25.4 Vibración y traqueteo en las operaciones de maquinado

Al describir los procesos de maquinado y las máquinas herramienta se hizo la observación en varias ocasiones que la *rigidez de la máquina* es tan importante como cualquier otro parámetro del maquinado. Poca rigidez ocasiona *vibración* y *traqueteo* de las herramientas de corte y los componentes de la máquina, por lo que se pueden tener efectos perjudiciales en la calidad del producto. La vibración y el traqueteo al maquinar son fenómenos complejos y se revisarán en breve como guía.

La vibración y el traqueteo incontrolados pueden provocar lo siguiente:

- Mal acabado de la superficie, como se muestra en la parte central derecha de la figura 25.13.
- Pérdida de exactitud dimensional de la pieza de trabajo.
- Desgaste prematuro, astillado y falla de la herramienta de corte, consideración que es crítica con los materiales frágiles para las herramientas, como cerámicos, carburos y diamante.
- Posible daño a los componentes de la máquina herramienta por vibración excesiva.
- Ruido molesto, en particular si es de alta frecuencia como el chirrido que se escucha cuando se maquina latón en un torno.

Hay dos tipos básicos de vibración al maquinar: forzada y autoexcitada.

Vibración forzada. Por lo general la vibración forzada es ocasionada por alguna fuerza *periódica* que se genera en la máquina herramienta, como en los engranajes, desbalance de los componentes de la máquina herramienta, falta de alineación y motores y bombas. En operaciones como el fresado o torneado de un eje inclinado o con cuñero o barreno radial, las vibraciones forzadas las ocasiona el contacto periódico de la herramienta de corte con la superficie de la pieza de trabajo (vea por ejemplo las figuras 24.9 y 24.14).

La solución básica para las vibraciones forzadas consiste en *aislar* o retirar el elemento que las induce. Por ejemplo, si la frecuencia forzada es la frecuencia natural, o está cerca, de un componente del sistema de la máquina herramienta, puede aumentarse o reducirse una de las dos frecuencias. La amplitud de la vibración se reduce con el aumento de la rigidez o el amortiguamiento del sistema.

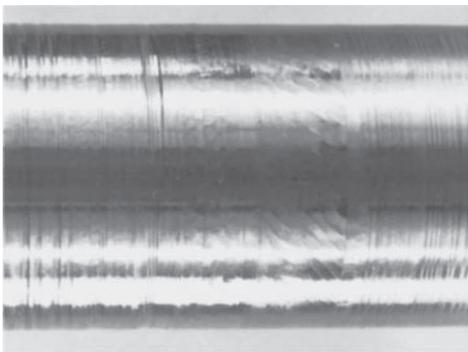


FIGURA 25.13 Marcas de traqueteo (en la parte central derecha de la fotografía) en la superficie de una parte girada. *Fuente:* Cortesía de General Electric Company.

Por lo general los parámetros de corte no parecen tener mucha influencia en la magnitud de las vibraciones forzadas; sin embargo, una gran ayuda puede ser cambiar la velocidad de corte y la geometría de la herramienta. También se reconoce que la fuente de las vibraciones se minimiza con el cambio de la configuración de los componentes de la máquina herramienta, como se hace cuando las fuerzas generadas estén cerca o actúan a través del *centro de gravedad* de un componente particular. Este método reducirá el momento de flexión del componente, con lo que se reducirán las deflexiones y mejorará la exactitud dimensional.

Vibración autoexcitada. En general se le llama **traqueteo**, es una vibración que se autoexcita por la interacción del proceso de remoción de viruta con la estructura de la máquina herramienta. Las vibraciones autoexcitadas suelen tener una amplitud muy grande y son audibles. Lo común es que el traqueteo comience con una perturbación en la zona de corte, como puede ser (a) el tipo de viruta producida; (b) falta de homogeneidad en el material de la pieza de trabajo o en su condición superficial y (c) variaciones en las condiciones de fricción en la interfase herramienta-viruta, como resultado de los fluidos de corte y su eficacia.

El tipo más importante de vibración autoexcitada es el traqueteo regenerativo, que se ocasiona cuando una herramienta corta una superficie con rugosidades o alteraciones geométricas desarrolladas en el corte previo (vea las figuras 21.2 y 21.21). De modo que la profundidad del corte varía y las variaciones resultantes en la fuerza de corte someten la herramienta a vibraciones; el proceso continúa repetidamente, de ahí el término *regenerativo*. Este tipo de vibración se observa fácilmente cuando se maneja un automóvil en una carretera en mal estado, cuando sucede el llamado *efecto lavadora*.

Las vibraciones autoexcitadas por lo general se controlan:

- Aumentando la *rigidez*, y en especial la *rigidez dinámica* del sistema; el sistema incluye no sólo la herramienta, el portaherramienta, el chasis de la máquina, etc., sino también la *pieza de trabajo* y la forma en que se sostiene.
- *Amortiguando* el sistema.

La **rigidez dinámica** se define como la razón de la amplitud de la fuerza aplicada a la amplitud de la vibración. Por ejemplo, recuerde que en la operación de trepanado, en la figura 23.24b, hay cuatro componentes de máquina implicados en las deflexiones que causarían vibraciones: (a) husillo, (b) brazo de soporte de la herramienta de corte, (c) broca y (d) herramienta de corte.

La experiencia y el análisis del sistema indicarían que, a menos que todos los componentes del sistema sean suficientemente rígidos, la operación de trepanado probablemente conducirá a traqueteo, comenzando con una vibración de torsión alrededor del eje del husillo y con el giro del brazo. Dos ejemplos similares son (a) barrenos largos y finos que sufren vibraciones de torsión y (b) herramientas de corte largas o con mal apoyo, como se ilustra en la figura 23.3.

Factores que influyen en el traqueteo. Se ha observado que la tendencia al traqueteo durante el maquinado es proporcional a las fuerzas de corte y la profundidad y ancho del corte. Debido a que las fuerzas de corte se incrementan con la resistencia (por tanto con la dureza del material de la pieza de trabajo), la tendencia al traqueteo por lo general se incrementa cuando la dureza aumenta. Entonces, las aleaciones de aluminio y magnesio, por ejemplo, tienen menos tendencia a traquetear que los aceros inoxidables martensíticos y endurecidos por precipitación, aleaciones de níquel y aleaciones refractarias de alta temperatura.

Otro factor importante en el traqueteo es el tipo de viruta producida durante las operaciones de corte. Las virutas continuas involucran básicamente fuerzas de corte estables y no causan traqueteo; por otro lado, las virutas discontinuas y aserradas (figura 21.5) sí lo hacen. Estos tipos de virutas se producen periódicamente y las variaciones

resultantes en la fuerza durante el corte llegan a ocasionar traqueteo. Otros factores que contribuyen al traqueteo son el uso de herramientas o cortadores sin filo, falta de fluidos de corte y rieles y componentes desgastados en la máquina herramienta.

Amortiguamiento. El *amortiguamiento* se define como la tasa a que decaen las vibraciones. Este efecto se demuestra con los amortiguadores de un automóvil, al empujar hacia arriba y abajo la parte frontal o trasera del vehículo y observar lo rápido que cesa el movimiento vertical. El amortiguamiento es un factor importante en el control de la vibración y movimiento de la máquina herramienta; consiste en amortiguamiento interno y externo:

1. El **amortiguamiento interno** resulta de la pérdida de *energía* en los materiales durante la vibración; por ejemplo, los materiales compósitos tienen una capacidad amortiguadora mayor que el hierro fundido gris, como se aprecia en la figura 25.14. La diferencia en la capacidad de amortiguamiento de los materiales se observa fácilmente si se les golpea con un mazo y se escucha el sonido. Por ejemplo, pruebe a golpear un címbalo de latón, una pieza de concreto y una pieza de madera y escuche las variaciones de su sonido.

Las *uniones remachadas* en la estructura de una máquina herramienta también son una fuente de amortiguamiento, su eficacia depende del tamaño, ubicación y número de uniones. Debido a que la fricción disipa energía, los movimientos pequeños relativos a lo largo de uniones secas (sin lubricar) incrementan el amortiguamiento. Como las máquinas herramienta constan de cierto número de componentes largos y pequeños, ensamblados de varias maneras, este tipo de amortiguamiento es acumulativo. En la figura 25.15 observe, por ejemplo, cómo aumenta el amortiguamiento conforme se incrementa el número de componentes de un torno y sus áreas de contacto. Sin embargo, la rigidez conjunta de la máquina herramienta disminuirá si se incrementa el número de uniones. Como se dijo e ilustró en la figura 23.17b, el amortiguamiento puede lograrse por medios mecánicos en los que la energía se disipa por la resistencia a la fricción de los componentes dentro de la estructura de una barra de mandrinado.

2. El **amortiguamiento externo** se logra con amortiguadores externos, similares a los de los automóviles o maquinaria. Con ese propósito se han desarrollado e instalado en máquinas herramienta amortiguadores especiales de vibración. La maquinaria puede instalarse en pisos y cimentaciones preparados especialmente para aislar las vibraciones forzadas, como las de otras máquinas cercanas instaladas en el mismo taller.

Lineamientos para reducir la vibración y el traqueteo. Del análisis anterior, es evidente que debe lograrse un balance entre el aumento de la rigidez de una máquina y el mayor amortiguamiento que se desea, en particular en la construcción de máquinas herramienta

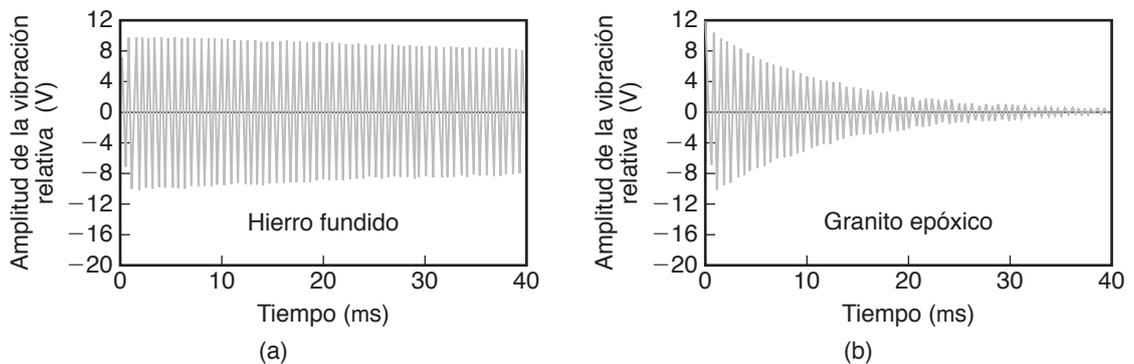


FIGURA 25.14 Capacidad amortiguadora relativa de (a) hierro fundido gris y (b) material compuesto de granito epóxico. La escala vertical es la amplitud de vibración y la horizontal es la escala de tiempo.

de alta precisión. En varias secciones de los capítulos 23 y 24 se dieron lineamientos para reducir la vibración y el traqueteo en las operaciones de maquinado. Esos lineamientos básicos se resumen en lo siguiente:

- Minimizar las herramientas alargadas.
- Mejorar la rigidez de los dispositivos portaherramientas y apoyar rígidamente las piezas de trabajo.
- Modificar la herramienta y la geometría del cortador para minimizar las fuerzas.
- Cambiar los parámetros del proceso, como la velocidad de corte, avance, profundidad de corte y fluidos de corte.
- Incrementar la rigidez de la máquina herramienta y sus componentes, con la mejora de su diseño y el uso de secciones transversales más grandes así como materiales con un módulo de elasticidad mayor.
- Mejorar la capacidad de amortiguamiento de la máquina herramienta.

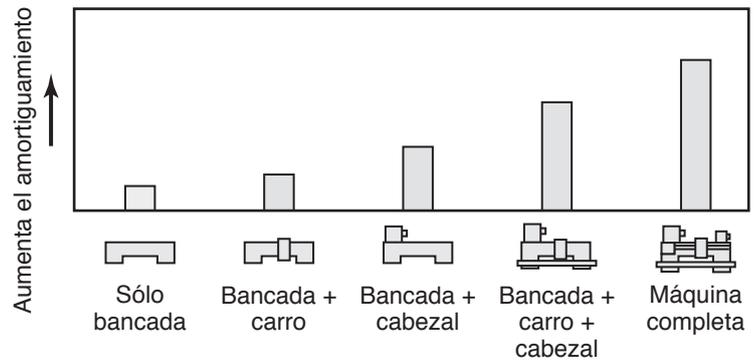


FIGURA 25.15 El amortiguamiento de las vibraciones es función del número de componentes en un torno. Las uniones disipan energía; a mayor cantidad de uniones, mayor es la capacidad de amortiguamiento de la máquina (vea también la figura 23.2). *Fuente:* Tomado de J. Peters.

25.5 Maquinado de alta velocidad

Con la demanda continua por aumentar la productividad y disminuir los costos de producción, las tendencias son para incrementar la velocidad del corte y la tasa de remoción de material en las operaciones de maquinado, en particular en las industrias aeroespacial y automotriz.

El término “alta” en *maquinado de alta velocidad* (HSM, por sus siglas en inglés) es algo relativo; sin embargo, como guía general, puede definirse un rango aproximado de velocidades de corte como sigue:

1. **Alta velocidad:** 600 a 1800 m/min (2000 a 6000 pies/min).
2. **Muy alta velocidad:** 1800 a 18 000 m/min (6000 a 60 000 pies/min).
3. **Ultra alta velocidad:** mayor que 18 000 m/min.

Las *velocidades rotacionales en el husillo* de las máquinas herramienta están ahora en el rango de hasta 50 000 rpm, aunque la industria automotriz por lo general las ha limitado a 15 000 rpm para una mayor confiabilidad y menos tiempo ocioso en caso de que ocurriera una falla. La *potencia del husillo* requerida en el maquinado de alta velocidad suele ser del orden de 0.004 W/rpm (0.005 hp/rpm), mucho menos que en el maquinado tradicional, que en general está en el rango de 0.2 a 0.4 W/rpm (0.25 a 0.5 hp/rpm). Las tasas de avance en el maquinado de alta velocidad son ahora de 1 m/s (3 pies/s) y las de aceleración de los componentes de una máquina herramienta son muy altas.

Los diseños del husillo para altas velocidades requieren *mucha rigidez y exactitud*, y por lo general implican un motor eléctrico integral. La armadura se construye sobre el eje y el estator se coloca en la pared de la carcasa del husillo. Los rodamientos son elementos giratorios o hidrostáticos; esto último es más deseable porque requiere menos espacio que los primeros. Debido a la *inercia* durante la aceleración y desaceleración de los componentes de la máquina herramienta, una consideración importante es el uso de materiales ligeros, como cerámicos y compósitos.

La selección de los materiales apropiados para la herramienta de corte siempre es una consideración importante. Con base en los análisis de las herramientas y su selección presentados en el capítulo 22, y en especial en la revisión de la tabla 22.2, es evidente que en función del material de la pieza de trabajo, los materiales candidatos para la herramienta en las operaciones de alta velocidad son los carburos, cerámicos, nitruro de boro cúbico y diamante.

También es importante observar que el maquinado de alta velocidad debe considerarse sobre todo para operaciones en las que el **tiempo de corte** es una parte significativa del tiempo total de la operación de maquinado conjunta. Como se describe en la sección 38.6 y el capítulo 40, el **tiempo sin corte** y otros diferentes factores son consideraciones importantes en la evaluación conjunta de los beneficios del maquinado de alta velocidad.

Estudios han indicado que el maquinado de alta velocidad es económico para ciertas aplicaciones específicas. Como ejemplos de éxito se menciona que se han maquinado: (a) componentes de aluminio estructural para aeronaves; (b) propelas de 6 m (20 pies) de diámetro para submarinos, hechas de una aleación de níquel-aluminio-bronce y con un peso de 55 000 kg (50 ton), y (c) motores de automóvil con una productividad 5 a 10 veces mayor que con el maquinado tradicional. El maquinado de alta velocidad de contornos complejos con tres y cinco ejes ha sido posible gracias a los avances de la tecnología de control CNC, como se describe al respecto de los *centros de maquinado* en este capítulo y en el 37.

Otro factor importante en la adopción del maquinado de alta velocidad ha sido el requerimiento de mejorar más las tolerancias dimensionales. Observe en la figura 21.14 que, a medida que aumenta la velocidad de corte, un gran porcentaje del calor generado lo disipa la viruta, con la herramienta y la pieza de trabajo con una temperatura cercana a la del ambiente. Esto es benéfico, ya que no hay una expansión térmica significativa y tampoco distorsión de la pieza de trabajo durante el maquinado.

Las consideraciones importantes en el maquinado de alta velocidad se resumen como sigue:

1. El diseño del husillo, para obtener rigidez, exactitud y balance a velocidades rotacionales muy altas.
2. Unidades de avance rápido.
3. Inercia de los componentes de la máquina herramienta.
4. Selección de las herramientas de corte apropiadas.
5. Parámetros de procesamiento y su control computarizado.
6. Dispositivos de sujeción del trabajo, que puedan manejar las fuerzas centrífugas.
7. Sistemas de remoción de la viruta, que sean eficaces a tasas muy altas de remoción de material.

25.6 Maquinado de alta dureza

Se ha observado que a medida que se incrementa la dureza de la pieza de trabajo, disminuye su facilidad para ser maquinada y el desgaste y la fractura, el acabado de la superficie, así como su integridad, pueden volverse problemas graves. Sin embargo, es posible maquinar metales y aleaciones duras por medio de seleccionar un material de dureza apropiada para la herramienta y con el uso de herramientas para la máquina que tengan suficiente rigidez, potencia y precisión.

Un ejemplo es el maquinado de acabado de flechas hechas de acero tratado con calor (45-65 HRC), engranes, piñones y diferentes componentes automotrices, con el empleo de herramientas de corte hechas de nitruro de boro cúbico policristalino, (PcBN), cermetes o cerámicos. Esta operación se denomina *maquinado de alta dureza* o *torneado de alta dureza* (o maquinado duro) y produce partes maquinadas con buena exactitud dimensional, acabado de la superficie (tan bajo como 25 μm o 10 μpulg) e integridad de la superficie. Los factores importantes son: (a) la potencia disponible, (b) rigidez estática y dinámica de la máquina herramienta y su husillo y (c) dispositivos de sujeción del trabajo y accesorios.

Como se expuso en la sección 25.3, las tendencias en el diseño y construcción de máquinas herramienta modernas, en especial para el maquinado de alta dureza, incluyen el uso de rodamientos hidrostáticos para los husillos y deslizamientos. El cabezal y la bancada inclinados en las máquinas (vea la figura 23.11a) pueden estar hechos de *materiales compósitos de granito epóxico*, el cual tiene propiedades únicas, como una razón elevada de rigidez a ancho, estabilidad térmica y buena capacidad de amortiguamiento. La selección de la herramienta de corte y la preparación del borde también son importantes para evitar la falla prematura en el maquinado de alta dureza.

A partir de las consideraciones técnicas, económicas y ecológicas, se ha encontrado que el torneado de alta dureza compite con éxito con el proceso de *rectificado* (capítulo 26). Por ejemplo, en algunos casos específicos, el torneado de alta dureza ha sido tres veces más rápido que el rectificado, con menos operaciones para terminar la parte, y el uso de hasta cinco veces menos energía. En el ejemplo 26.4 se presenta una comparación detallada del maquinado de alta dureza *versus* el rectificado.

25.7 Maquinado de ultraprecisión

Desde el comienzo de la década de 1960 se han incrementado las demandas por la precisión de la manufactura de componentes para aplicaciones en computadoras, equipos electrónicos, nucleares y de defensa. Algunos ejemplos específicos incluyen espejos y lentes ópticos, componentes para conexión de fibra óptica, discos de memorias de computadora, equipo de metrología de todas clases y rodillos para máquinas de fotocopiado. Los requerimientos de acabado superficial son del orden de nanómetros (10^{-9} m o $0.04 \mu\text{pulg}$) y las tolerancias dimensionales y exactitudes de la forma están en el rango de micras (μm) y submúltiplos de micra.

La tendencia hacia la manufactura de ultraprecisión sigue al alza. Las modernas **máquinas herramienta de ultraprecisión**, con controles avanzados por computadora, ahora son capaces de situar una herramienta cortadora con una exactitud cercana a 1 nm, como se ve en la figura 25.16. Asimismo, observe el lector en dicha figura que se está obteniendo mayor precisión con procesos como el maquinado abrasivo, de haz de iones, y manipulación molecular.

La herramienta de corte para el *maquinado de ultraprecisión* es casi exclusivamente un diamante monocristalino, donde el proceso se denomina **torneado de diamante**. La herramienta de diamante tiene un borde cortador pulido, con un radio muy pequeño del orden de nanómetros. El desgaste del diamante puede ser un problema significativo y los avances más recientes incluyen el **torneado de diamante criogénico**, en el cual el sistema de la herramienta se enfría con nitrógeno líquido a una temperatura de alrededor de -120°C (-184°F).

Los materiales de la pieza de trabajo para el maquinado de ultraprecisión incluyen aleaciones de cobre, aluminio, plata, oro, níquel electrolítico, materiales infrarrojos y plásticos (acrílicos). Con profundidades de corte en el rango de nm, los materiales duros y frágiles producen virutas continuas en un proceso conocido como **rectificado de régimen dúctil** (vea la sección 26.3.4); los cortes más profundos en los materiales frágiles producen astillas discontinuas.

Las máquinas herramientas para el maquinado de ultraprecisión están construidas con muy alta precisión y gran rigidez de la máquina, el husillo y los dispositivos de sujeción del trabajo. Estas máquinas tienen componentes hechos de materiales estructurales con poca expansión térmica y buena estabilidad dimensional (vea la sección 25.3). Se localizan en un ambiente libre de polvo, donde la temperatura está controlada hasta fracciones de grado.

Deben evitarse las vibraciones de fuentes provenientes del interior de la máquina, y externas como maquinaria en las cercanías del mismo taller. Se utiliza metrología láser (sección 35.5) para el avance y control de la

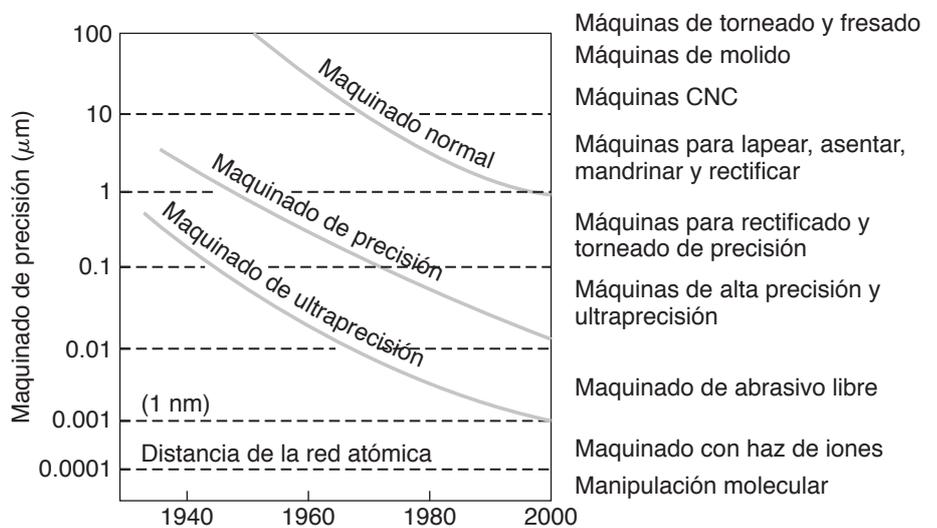


FIGURA 25.16 Mejoras en la exactitud del maquinado con el paso de los años, con el uso de tecnologías de maquinado de ultraprecisión. Fuente: Tomado de C. J. McKeown, N. Taniguchi, G. Byrne, D. Dornfeld y B. Denkena.

posición, y las máquinas están equipadas con sistemas muy avanzados de control por computadora y con herramientas de compensación de errores térmicos y geométricos.

Consideraciones generales para el maquinado de precisión. Hay varios factores importantes en el maquinado de precisión y ultraprecisión y en las máquinas herramienta, algo semejante a los del maquinado de alta velocidad:

1. El diseño, construcción y ensamble de las máquinas herramienta, inclusive el husillo, deben proveer rigidez, amortiguamiento y exactitud geométrica.
2. El control de movimiento de los diferentes componentes de la máquina, tanto lineal como rotacional.
3. La expansión térmica de la máquina herramienta y su compensación, además de control del ambiente de la máquina herramienta, en especial la temperatura ambiente.
4. Rendimiento y control en tiempo real de la máquina herramienta, así como la implementación de un sistema de monitoreo de las condiciones de la herramienta.

25.8 Economía del maquinado

El material y los parámetros de proceso que son relevantes para la eficiencia de las operaciones de maquinado ya se describieron en los tres capítulos anteriores. Al analizar la economía del maquinado también deben considerarse otros factores. Éstos incluyen los costos implicados en (a) las máquinas herramienta, los dispositivos y accesorios para sujetar el trabajo y herramientas de corte; (b) mano de obra y gastos asociados con los costos indirectos; (c) tiempo requerido para la puesta a punto de la máquina para una operación en particular; (d) manejo y movimiento del material, como la carga del material en bruto y la descarga de las partes maquinadas; (e) medición de la exactitud dimensional y exactitud del acabado superficial y (f) tiempos de corte y tiempos sin corte.

El tiempo real de maquinado es una consideración importante, y hay que recordar también el análisis de la sección 25.5 acerca del rol del tiempo en que no se realizan cortes en el maquinado de alta velocidad. Así, a menos que el tiempo sin corte sea una porción significativa del tiempo de taller, no debe considerarse el maquinado de alta velocidad a no ser que tenga otros beneficios.

El análisis económico se basa en la capacidad de alcanzar un objetivo deseado, como la tolerancia y acabado superficial, por lo que se requiere que un proceso de maquinado sea robusto y esté bajo control (vea la sección 36.5.1). Por ejemplo, si una fresa se monta de modo que la longitud expuesta del husillo varíe aleatoriamente con cada cambio de la herramienta, entonces esto por sí solo produciría tolerancias grandes. El mismo análisis es válido para diferentes máquinas herramienta cuya rigidez dinámica y capacidad de amortiguamiento tal vez difieran (vea la sección 25.3), el uso de cortadores con diferentes número de insertos, o la pérdida del control de la temperatura ambiente, etc., todo esto puede generar variaciones que afecten de manera importante la capacidad de maquinar con exactitud.

Es posible usar el diseño de experimentos multifactorial para caracterizar el sistema máquina herramienta/pieza de trabajo/sistema operador, pero este método es complejo y tiene sus propias limitaciones. Esta sección supondrá que un proceso se ha diseñado con cuidado para que sea robusto, de modo que las variaciones en estos factores puedan ignorarse, y se pueda explorar el efecto de la velocidad de corte en la economía y la productividad.

Minimización del costo por pieza maquinada. Como en todos los procesos y operaciones de la manufactura, los parámetros relevantes en el maquinado pueden seleccionarse y especificarse en forma tal que el *costo por pieza maquinada*, así como el *tiempo por pieza maquinada*, sean mínimos. Con el tiempo se han desarrollado varios métodos y enfoques para alcanzar esta meta, que hoy es más fácil con el creciente uso de computadoras y software amigable con el usuario. Sin embargo, con objeto de que los resultados de los métodos sean confiables, es esencial que los datos de entrada sean exactos y estén actualizados. A continuación se describe uno de los métodos más sencillos y utilizados

para analizar los costos del maquinado, se usa una operación de *torneado* para demostrar el enfoque.

Al maquinar una parte con torneado, el costo total por pieza maquinada, C_p , es

$$C_p = C_m + C_s + C_l + C_t, \quad (25.1)$$

donde

C_m = Costo del maquinado.

C_s = Costo de puesta a punto de la máquina, inclusive montar el cortador, colocar los accesorios y preparar la máquina herramienta para la operación.

C_l = Costo de cargar, descargar y manejo de la máquina.

C_t = Costo de las herramientas, que suele ser de alrededor de 5% del total de la operación de maquinado; por consiguiente, el uso de la herramienta menos cara no necesariamente es la forma apropiada de reducir los costos del maquinado.

El costo del maquinado está dado por

$$C_m = T_m (L_m + B_m), \quad (25.2)$$

donde T_m es el tiempo de maquinado por pieza, L_m es el costo de la mano de obra del personal de producción por hora y B_m es la *tasa de carga*, o *costos indirectos*, de la máquina, incluyendo depreciación, mantenimiento y mano de obra indirecta.

El costo de puesta a punto es una cifra de dinero fija por pieza. El costo de cargar, descargar y de manejo de la máquina es

$$C_l = T_l (L_m + B_m), \quad (25.3)$$

donde T_l es el tiempo involucrado en cargar y descargar la parte, en cambiar velocidades y tasas de avance y en hacer cualesquiera otros ajustes antes del maquinado. El costo de las herramientas es

$$C_t = \frac{1}{N_i} [T_c (L_m + B_m) + D_i] + \frac{1}{N_f} [T_i (L_m + B_m)], \quad (25.4)$$

donde N_i es el número de partes maquinadas por inserto de la herramienta de corte, N_f es el número de partes que se pueden producir por filo del inserto, T_c es el tiempo requerido para cambiar el inserto, T_i es el tiempo requerido para indexar el inserto y D_i es la depreciación del inserto, en dinero.

El tiempo requerido para maquinar una parte es

$$T_p = T_l + T_m + \frac{T_c}{N_i} + \frac{T_i}{N_f}, \quad (25.5)$$

donde T_m tiene que calcularse para cada operación en particular realizada sobre la parte. Por ejemplo, consideremos una operación de torneado, donde el tiempo de maquinado (vea la sección 23.2) está dado por

$$T_m = \frac{L}{fN} = \frac{\pi LD}{fV}, \quad (25.6)$$

donde L es la longitud de corte, f es el avance, N es la velocidad angular (rpm) de la pieza de trabajo, D es el diámetro de la pieza de trabajo y V es la velocidad de corte (observe que en todas estas ecuaciones deben usarse las unidades apropiadas).

De la ecuación (21.25) para la vida de la herramienta, tenemos:

$$T = \left(\frac{C}{V} \right)^{1/n}, \quad (25.7)$$

donde T es el tiempo, en minutos, requerido para alcanzar un desgaste de cierta dimensión en el flanco, después del cual la herramienta tiene que ser reacondicionada o cambiada. Observe que la herramienta podría tener que reemplazarse debido a otras razones, como el desgaste por cavidad (craterizado), borde construido o desgaste en la nariz. Este análisis se restringe al *desgaste en el flanco* como el criterio importante de falla de la herramienta, pero podría hacerse más elaborado para que incluyera otras variables. El número de piezas maquinadas por filo del inserto se desprende de la ecuación de Taylor, la ecuación 21.25, como

$$N_f = \frac{T}{T_m}, \quad (25.8)$$

y el número de piezas por inserto está dado por

$$N_i = mN_f = \frac{mT}{T_m}. \quad (25.9)$$

En ocasiones no todos los bordes se utilizan antes de descartar el inserto; entonces, debe reconocerse que m corresponde al número de filos que en realidad se usan, no al número provisto por inserto. Al combinar las ecuaciones 25.6 a 25.9, resulta que

$$N_i = \frac{mfC^{1/n}}{\pi LDV^{(1/n)-1}}. \quad (25.10)$$

Ahora el costo por pieza, C_p en la ecuación (25.1) puede definirse en términos de algunas variables. Para encontrar la velocidad óptima de corte y la vida óptima de la herramienta para que el **costo sea mínimo**, debemos diferenciar C_p con respecto de V e igualar a cero. Entonces,

$$\frac{\partial C_p}{\partial V} = 0. \quad (25.11)$$

La *velocidad óptima de corte*, V_o , es

$$V_o = \frac{C(L_m + B_m)^n}{\left(\frac{1}{n} - 1\right)^n \left\{ \frac{1}{m} [T_c(L_m + B_m) + D_i] + T_i(L_m + B_m) \right\}^n} \quad (25.12)$$

y la *vida óptima de la herramienta*, T_o , es

$$T_o = \left(\frac{1}{n} - 1\right) \frac{\frac{1}{m} [T_c(L_m + B_m) + D_i] + T_i(L_m + B_m)}{L_m + B_m}. \quad (25.13)$$

Para encontrar la velocidad óptima de corte y la vida óptima de la herramienta para que la **producción sea máxima**, T_p debe diferenciarse con respecto a V e igualar el resultado a cero. Entonces,

$$\frac{\partial T_p}{\partial V} = 0. \quad (25.14)$$

Así, la *velocidad óptima de corte* es

$$V_o = \frac{C}{\left[\left(\frac{1}{n} - 1\right) \left(\frac{T_c}{m} + T_i\right) \right]^n}, \quad (25.15)$$

y la vida óptima de la herramienta es

$$T_o = \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \left(\frac{T_c}{m} + T_i \right). \quad (25.16)$$

En las figuras 25.17a y b se presentan gráficas *cualitativas* de *costo mínimo por pieza* y *tiempo mínimo por pieza* (y por tanto la *tasa máxima de producción*). Debe observarse que el costo de maquinar una parte depende también del acabado superficial que se requiere; el costo adicional aumenta rápidamente con el acabado más fino de la superficie, como se muestra en la figura 26.35.

El análisis anterior pone de manifiesto la importancia de identificar todos los parámetros relevantes en una operación de maquinado, la determinación de varios factores de costo, la obtención de curvas de la vida de la herramienta relevantes para la operación particular y la medición apropiada de los diferentes intervalos de tiempo involucrados en la operación conjunta. La importancia de obtener datos exactos se ilustra en la figura 25.17; observe que cambios pequeños en la velocidad de corte pueden tener un efecto significativo en el costo mínimo o en el tiempo mínimo por pieza. Las velocidades y avances

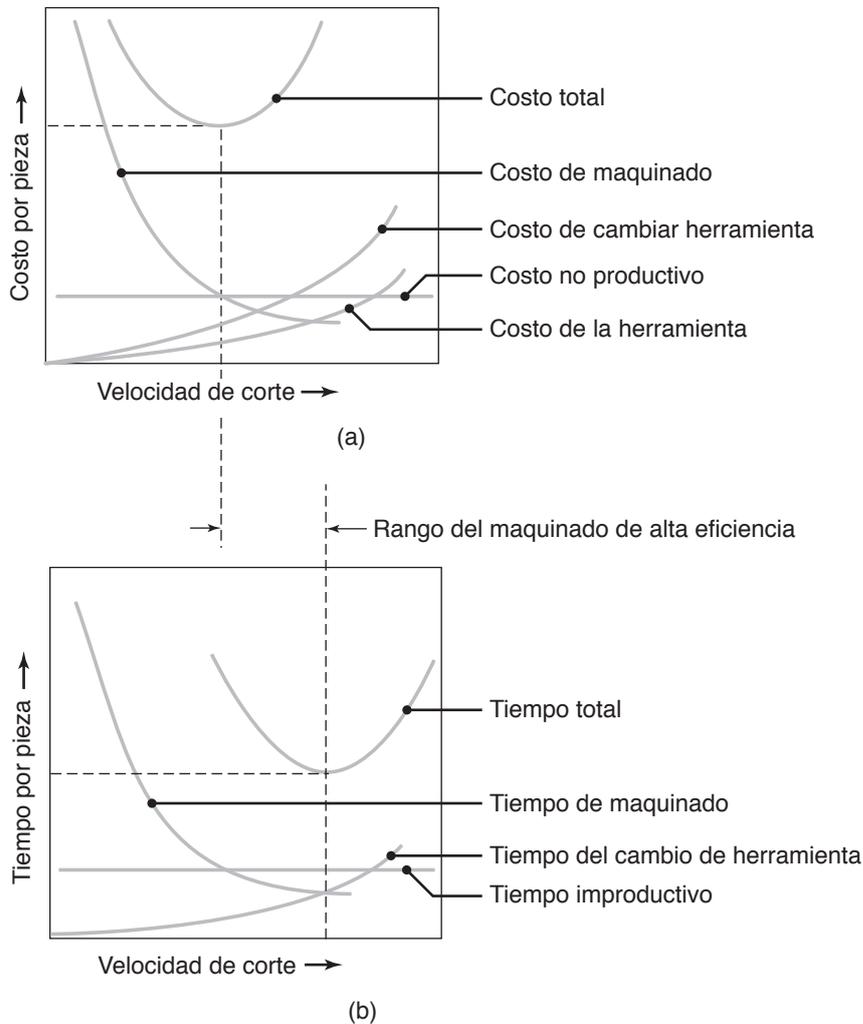


FIGURA 25.17 Gráficas que muestran (a) el costo por pieza y (b) el tiempo por pieza en el maquinado; observe las velocidades óptimas tanto para el costo como para el tiempo. El rango entre las dos se conoce como *rango del maquinado de alta eficiencia*.

recomendados en las tablas 23.4 y 24.2, por lo general, están en el *rango de maquinado de alta eficiencia*, el cual se encuentra entre las velocidades que producen la economía más rentable y la tasa de producción más elevada.

Para muchas aplicaciones, como el maquinado de acabado de superficies en fundiciones de metales suaves, el costo por pieza del maquinado es casi insensible a la velocidad de corte dentro de este rango; es decir, la curva de la figura 25.17 es casi plana. Sin embargo, con materiales difíciles de maquinar como los que se encuentran de manera rutinaria en la industria de los productos médicos y la aeroespacial, el costo por pieza es muy sensible a la velocidad de corte. En consecuencia, se debe tener gran cuidado para garantizar que el maquinado tenga lugar cerca de la velocidad deseada. Además, debe reconocerse que los datos que aparecen en las tablas 23.4 y 24.2 son un resumen de varias herramientas y grados de material; es frecuente que se disponga de datos para el maquinado de aleaciones particulares.

Es común que se haga un análisis económico para todas las operaciones de manufactura, y también puede ser una herramienta valiosa para guiar el proceso de selección. Por ejemplo, el costo por pieza en un proceso de fundición en arena para producir los materiales en bruto y en una operación de maquinado para lograr las tolerancias dimensionales finales se puede calcular a partir de una ecuación semejante a la (25.1), pero con la inclusión de los costos asociados con la fundición en arena, digamos el costo de la producción del molde, el patrón de depreciación, etc. Se puede hacer un cálculo similar con un método del proceso que use metalurgia de polvos (lo que incrementaría los costos de los dados y la maquinaria), pero que requiere menos maquinado debido a su capacidad para producir partes casi terminadas y con tolerancias estrictas, lo que reduce los costos del maquinado. Entonces, la comparación de las estimaciones del costo ayudaría a determinar una estrategia de procesamiento, como se analiza con mucho detalle en la sección 40.9.

RESUMEN

- Debido a que son versátiles y capaces de realizar varias operaciones de maquinado en piezas de trabajo pequeñas o grandes de varias formas, los centros de maquinado ahora se encuentran entre las más importantes máquinas herramienta. Su selección depende de factores como la complejidad de las partes, el número y tipo de las operaciones de maquinado a realizar, el número de herramientas de corte que se requieren y la exactitud dimensional y la tasa de producción especificada.
- La vibración y el traqueteo en el maquinado son consideraciones importantes para la exactitud dimensional de la pieza de trabajo, el acabado de la superficie y la vida de la herramienta. La rigidez y la capacidad de amortiguamiento de las máquinas herramienta son factores muy importantes para controlar la vibración y el traqueteo.
- La economía de las operaciones de maquinado depende de factores como los costos no productivos, los de maquinado, del cambio de herramienta y de las herramientas. Se pueden determinar las velocidades óptimas de corte tanto para el tiempo mínimo de maquinado por pieza como para el costo mínimo de maquinado por pieza.

TÉRMINOS CLAVE

Amortiguamiento	Centro de maquinado universal	Maquinado de alta velocidad	Rigidez dinámica
Brazo cambiador de herramienta	Centro de torneado	Maquinado de ultraprecisión	Tarima
Cambiador automático de herramientas	Construcción modular	Máquinas reconfigurables	Traqueteo
Cambiador automático de tarimas	Envoltorio de trabajo	Palpadores	Traqueteo regenerativo
Centro de maquinado	Estación verificadora de la herramienta y la parte	Rango del maquinado de alta eficiencia	Vibración autoexcitada
	Hexápodos	Recolección de viruta	Vibración forzada
	Maquinado de alta dureza	Rigidez	

BIBLIOGRAFÍA

- Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 3a. ed., Marcel Dekker, 2005.
- Chang, K., *Machining Dynamics: Fundamentals, Applications and Practices*, Springer, 2010.
- Dashchenko, A. I. (ed.), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Springer, 2006.
- Davim, J. P., *Machining of Hard materials*, Springer, 2011.
- Davim, J. P., *Machining of Complex Sculptured Surfaces*, Springer, 2012.
- Erdel, B., *High-speed Machining*, *Society of Manufacturing Engineers*, 2003.
- Gegg, B. C., Suh, C. S. y Luo, C. J., *Machine Tool Vibrations and Cutting Dynamics*, Springer, 2011.
- Ito, Y., *Modular Design for Machine Tools*, McGraw-Hill, 2008.
- Ito, Y., *Thermal Deformation in Machine Tools*, McGraw-Hill, 2010.
- Joshi, P. H., *Machine Tools Handbook*, McGraw-Hill, 2008.
- Lopez de Lacalle, N., y Lamikiz, A. (eds.), *Machine Tools for High Performance Machining*, Springer, 2009.
- Mickelson, D., *Hard Milling & High Speed Machining: Tools of Change*, Hanser Gardner, 2005.
- Rivin, E. I., *Stiffness and Damping in Mechanical Design*, Marcel Dekker, 1999.
- Schmitz, T. L. y Smith, K. S., *Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity*, Springer, 2008.
- Zhang, D., *Parallel Robotic Machine Tools*, Springer, 2009.

PREGUNTAS DE REPASO

- 25.1** Describa las características distintivas de los centros de maquinado y explique por qué son tan versátiles estas máquinas.
- 25.2** Explique cómo funciona el sistema de herramientas en un centro de maquinado. ¿Cuáles son los tiempos normales para el cambio de herramientas?
- 25.3** Explique las tendencias en los materiales usados en las estructuras de las máquinas herramienta.
- 25.4** ¿Hay alguna diferencia entre el traqueteo y la vibración? Explique.
- 25.5** ¿Cuáles son las diferencias entre la vibración forzada y la autoexcitada?
- 25.6** Explique la importancia de las cimentaciones en la instalación de las máquinas herramienta.
- 25.7** Explique por qué los cambiadores automatizados de tarimas y los de herramientas son parte importante de los centros de maquinado.
- 25.8** ¿De qué tipos de materiales están fabricadas normalmente las máquinas herramienta? ¿Por qué?
- 25.9** ¿Qué significa construcción “modular” de las máquinas herramienta?
- 25.10** ¿Qué es un hexápodo? ¿Cuáles son sus ventajas?
- 25.11** ¿Qué factores contribuyen a los costos en las operaciones de maquinado?
- 25.12** Enumere las razones por las que la temperatura es importante en las operaciones de maquinado.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 25.13** Explique los factores técnicos y económicos que llevaron al desarrollo de los centros de maquinado.
- 25.14** Las velocidades del husillo en los centros de maquinado varían en un amplio rango. Explique por qué es así, con aplicaciones específicas.
- 25.15** Explique la importancia de la rigidez y el amortiguamiento de las máquinas herramienta. Describa cómo se implementan.
- 25.16** ¿Hay operaciones de maquinado descritas en los capítulos 23 y 24 que no se puedan realizar en centros de maquinado y torneado? Explique con ejemplos específicos.
- 25.17** ¿Qué tan importante es el control de la temperatura del fluido de corte en las operaciones que se realizan en los centros de maquinado? Explique.
- 25.18** Revise la figura 25.10 que se refiere a centros de maquinado modulares y describa algunas piezas de trabajo y operaciones que serían apropiadas para tales máquinas.
- 25.19** Revise la figura 25.15 y estime la cantidad de amortiguamiento que esperarías en un hexápodo. ¿Es la vibración un problema grave en los hexápodos? Explique.
- 25.20** Describa los efectos perjudiciales de la vibración y el traqueteo en las operaciones de maquinado.
- 25.21** Describa algunas situaciones específicas en las cuales sería importante la distorsión térmica de los componentes de las máquinas herramienta.
- 25.22** Explique las diferencias en las funciones de una torreta y un husillo en los centros de girado.
- 25.23** Explique cómo se operarían los arreglos de las tarimas que se muestran en las figuras 25.4a y b al usar esas máquinas en un taller.
- 25.24** Revise el cambiador de herramientas que aparece en la figura 25.5. ¿Hay algunas restricciones al hacer sus operaciones más rápidas con objeto de reducir el tiempo del cambio de herramientas? Explique.
- 25.25** Enuncie los parámetros que influyen en la temperatura en el corte de metales y explique por qué y cómo lo hacen.
- 25.26** Enuncie y explique los factores que contribuyen a un mal acabado de la superficie en operaciones de maquinado.
- 25.27** ¿Puede realizarse el maquinado de alta velocidad sin utilizar fluidos de corte? Explique.

25.28 Además del número de uniones en una máquina herramienta (vea la figura 25.15), ¿qué otros factores influyen en la tasa a que se incrementa el amortiguamiento? Explique.

25.29 Describa los tipos y tamaños de las piezas de trabajo que no sería apropiado maquinar en un centro de maquinado. Proponga ejemplos específicos.

25.30 Además de que cada uno tenga un mínimo, ¿son importantes las formas y pendientes generales de las curvas del costo y del tiempo total en la figura 25.17? Explique.

25.31 Explique las ventajas y desventajas de las máquinas herramienta construidas con fundidos de hierro gris.

25.32 ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de (a) estructuras de acero soldado; (b) estructuras de acero remachado y (c) los

componentes de las máquinas herramienta pegados con adhesivos? Explique.

25.33 ¿Cuáles serían las ventajas y limitaciones de usar concreto o polímero de concreto en las máquinas herramienta?

25.34 Explique cómo haría para reducir cada uno de los factores de costo en las operaciones de maquinado. ¿Qué dificultades encontraría al hacerlo?

25.35 Describa las piezas de trabajo que no sería adecuado maquinar en un centro de maquinado. Dé ejemplos específicos.

25.36 Proporcione ejemplos de vibración forzada o vibración autoexcitada en la práctica general de la ingeniería.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

25.37 El husillo de un centro de maquinado y la herramienta se extienden 10 pulgadas desde el chasis de la máquina herramienta. Calcule el cambio de temperatura aceptable con el fin de mantener una tolerancia de 0.001 pulg en el maquinado. Suponga que el husillo está hecho de acero.

25.38 Con el uso de los datos que se dan en el ejemplo, estime el tiempo requerido para manufacturar las partes en el ejemplo 25.1 con el maquinado convencional y con el de alta velocidad.

25.39 El husillo de un centro de maquinado y la herramienta se extienden 12 pulgadas a partir del chasis de su máquina herramienta. ¿Qué cambio de temperatura podría aceptarse para mantener una tolerancia de 0.0001 pulg en el maquinado? ¿Y una de 0.001 pulg? Suponga que el husillo está hecho de acero.

25.40 En la producción de una válvula maquinada, la tasa de mano de obra es de \$19.00 por hora y la tasa general del costo indirecto es de \$15.00 por hora. La herramienta es un inserto de cerámico con cuatro caras y cuesta \$25.00; toma cinco minutos cambiarla y un minuto indexarla. Estime la velocidad óptima de corte desde una perspectiva del costo. Use $C = 100$ para V_o expresada en m/min.

25.41 Estime la velocidad óptima de corte en el problema 25.40 para una producción máxima.

25.42 Desarrolle una ecuación para la velocidad óptima de corte en el fresado refrentado empleando un cortador con insertos.

25.43 Desarrolle una ecuación para la velocidad óptima de corte en el torneado, donde la herramienta sea de acero de alta velocidad que se puede readecuar periódicamente.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

25.44 Si usted fuera el ingeniero en jefe a cargo del diseño de centros de maquinado y torneado avanzados, ¿qué cambios y mejoras recomendaría hacer en los modelos existentes? Explique.

25.45 Revise la bibliografía técnica y plantee las tendencias en el diseño de las máquinas herramienta modernas. Explique por qué se dan dichas tendencias.

25.46 Elabore una lista de componentes de las máquinas herramienta que podrían fabricarse de cerámicos y explique por qué serían apropiados los cerámicos.

25.47 Investigue la bibliografía de varias empresas fabricantes de máquinas herramienta y prepare una tabla exhaustiva que indique las capacidades, tamaños, potencia y costos del maquinado y de centros de maquinado. Comente sobre sus observaciones.

25.48 El costo de los centros de maquinado y de torneado es considerablemente más alto que el de las máquinas herramienta tradicionales. Puesto que muchas operaciones que se realizan en centros de maquinado también podrían hacerse en máquinas convencionales, ¿cómo justificaría usted el alto costo de dichos centros? Explique con ejemplos apropiados.

25.49 En su experiencia con el uso de herramientas y otros equipos, tal vez haya pasado por situaciones en las que experi-

mentó vibración y traqueteo. Describa su vivencia y explique lo que haría para minimizar la vibración y el traqueteo.

25.50 Describa sus reflexiones acerca de si es factible o no incluir operaciones de rectificado (vea el capítulo 26) en los centros de maquinado. Explique la naturaleza de cualesquiera dificultades que haya encontrado.

25.51 ¿Son la exactitud y el acabado superficial que se pueden lograr en un centro de maquinado, una función del número de insertos en un cortador? Explique.

25.52 El experimento siguiente está diseñado para demostrar mejor el efecto del exceso de longitud de la herramienta en la vibración y el traqueteo: Raspe con una herramienta afilada la superficie de una pieza de metal suave, sujetando la herramienta con el brazo completamente estirado. Repita el experimento, esta vez sujetando la herramienta lo más cerca posible de la pieza de trabajo. Describa sus observaciones sobre la tendencia a vibrar que vio en la herramienta. Repita el experimento con diferentes tipos de materiales metálicos y no metálicos.

25.53 Revise la parte mostrada en la figura 25.1a y enumere las operaciones de maquinado y las máquinas herramienta que recomendaría para producir dicha parte.

Operaciones de maquinado y acabado con abrasivos

CAPÍTULO 26

- El maquinado abrasivo es importante por su capacidad de dar una gran exactitud dimensional y acabado a la superficie de las partes.
- Hay una amplia variedad de procesos de acabado abrasivo, muchos de los cuales se basan en el mecanismo fundamental de la abrasión.
- Este capítulo comienza con una descripción del proceso de rectificado, el mecanismo de remoción de material, y los roles de los tipos de abrasivos y aglutinantes en las piedras de rectificado.
- Ciertas operaciones de maquinado abrasivo, como el pulido, lustrado, asentado y arenado (sanblastado) requieren un abrasivo aglutinado o recubierto; otros, como el maquinado ultrasónico, lapeado, maquinado con chorro abrasivo, el maquinado electroquímico y el rectificado, usan abrasivos no aglutinados.
- Estos procesos se describen con todo detalle, incluyendo sus capacidades, aplicaciones y consideraciones de diseño fundamentales.
- El capítulo termina con un análisis de las consideraciones económicas de las operaciones de acabado.

Partes comunes que se fabrican: cualquier parte que requiera gran exactitud dimensional y buen acabado de la superficie, como rodamientos de bolas y balines, anillos para pistones, válvulas, levas, engranes, herramientas y dados.

Procesos alternativos: maquinado de precisión, maquinado por descarga eléctrica, maquinado electroquímico, rectificado y maquinado con chorro abrasivo.

26.1 Introducción

Hay muchas situaciones en la manufactura donde los procesos descritos hasta este momento no pueden producir la exactitud dimensional o el acabado de la superficie que se requieren para una parte, o el material de la pieza de trabajo es demasiado duro o muy quebradizo para su proceso. Por ejemplo, considere la exactitud y superficie tan lisa que requieren los rodamientos de bolas, pistones, válvulas, cilindros, levas, engranes, moldes y dados y numerosos componentes de precisión que se usan en la instrumentación. Uno de los métodos más comunes para producir esas características tan demandantes de las partes es el *maquinado abrasivo*.

Un **abrasivo** es una partícula pequeña, dura, con aristas afiladas y forma irregular (figura 26.1); la arena es el ejemplo más sencillo. Es capaz de remover pequeñas cantidades de material de una superficie por un proceso de corte que produce residuos diminutos. Aplicaciones familiares de los abrasivos son la *lija de papel* o *de tela*, que se usa para

26.1	Introducción	729
26.2	Abrasivos y abrasivos aglutinados	731
26.3	Proceso de rectificado	737
26.4	Operaciones de rectificado y rectificadoras	746
26.5	Consideraciones de diseño en el rectificado	755
26.6	Maquinado ultrasónico	755
26.7	Operaciones de acabado	756
26.8	Operaciones de desbarbado	761
26.9	Economía de las operaciones de maquinado y acabado con abrasivos	764

EJEMPLOS:

26.1	Fuerzas al rectificar una superficie	740
26.2	Acción de una piedra abrasiva	744
26.3	Patrones del ciclo en el rectificado cilíndrico	750
26.4	Rectificado <i>versus</i> torneado de alta dureza	753
26.5	Rectificado con banda de paleta reguladora de turbina	757

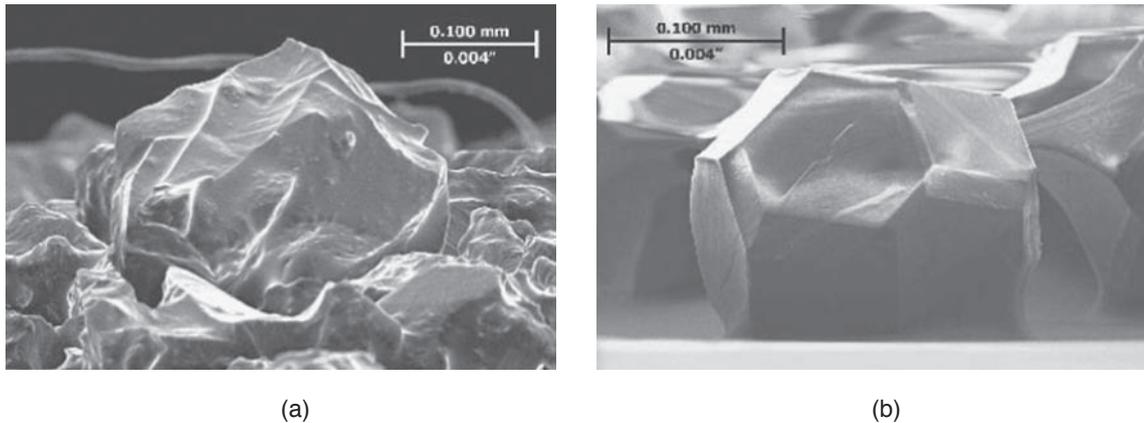


FIGURA 26.1 Granos abrasivos comunes; observe la forma angular con aristas afiladas. (a) Grano aislado de Al_2O_3 , con tamaño de malla 80, en una piedra abrasiva recién elaborada; (b) grano de diamante de tamaño de malla 80/100; los granos de diamante y nitruro de boro cúbico se pueden manufacturar en distintas geometrías, entre ellas la forma de “bloque” que se ilustra. Fuente: Cortesía de J. Badger.



FIGURA 26.2 Varios abrasivos aglutinados que se emplean en los procesos de maquinado por abrasión. Fuente: Cortesía de Norton Company.

alisar superficies y eliminar filos, y las *piedras abrasivas*, que se muestran en la figura 26.2, para afilar cuchillos y herramientas o dar buena exactitud a las dimensiones y el acabado de la superficie de numerosos componentes de productos. Los abrasivos también se usan para asentar, lapear, lustrear y pulir las piezas de trabajo.

Con el uso de máquinas controladas por computadora, actualmente los procesos abrasivos y sus equipos son capaces de producir una amplia variedad de geometrías para las piezas de trabajo, como puede verse en la figura 26.3, y una gran exactitud y excelentes acabados de la superficie, según se aprecia en las figuras 23.14 y 23.15, así como en la tabla 26.4. Por ejemplo, las tolerancias dimensionales de las partes llegan a ser menores de $1 \mu\text{m}$ ($40 \mu\text{pulg}$) y la rugosidad de la superficie puede ser tan fina como de $0.025 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{pulg}$).

Debido a que son duros, los abrasivos también se usan en los *procesos de acabado* de metales y aleaciones tratados con calor, y para partes muy duras en aplicaciones como (a) acabado de cerámicos y vidrios; (b) corte por tramos de barras, formas estructurales, mampostería y concreto; (c) eliminación de cordones y salpicaduras de soldadura; (d) creación de una superficie suave y plana en láminas de silicio para producir circuitos integrados; (e) pulido de rodamientos y rieles y (f) limpieza de superficies con chorros de aire o agua que contienen partículas abrasivas.

El capítulo comienza con la descripción de las características de los abrasivos, así como con su uso en distintos procesos de remoción de material por abrasión. Igual que con las operaciones de corte, primero se describe la mecánica de las operaciones de abrasión. Este conocimiento es esencial para facilitar la interacción (a) del material de la pieza de trabajo y las variables del proceso y (b) exactitud dimensional, acabado de la superficie e integridad de la superficie de las partes producidas.

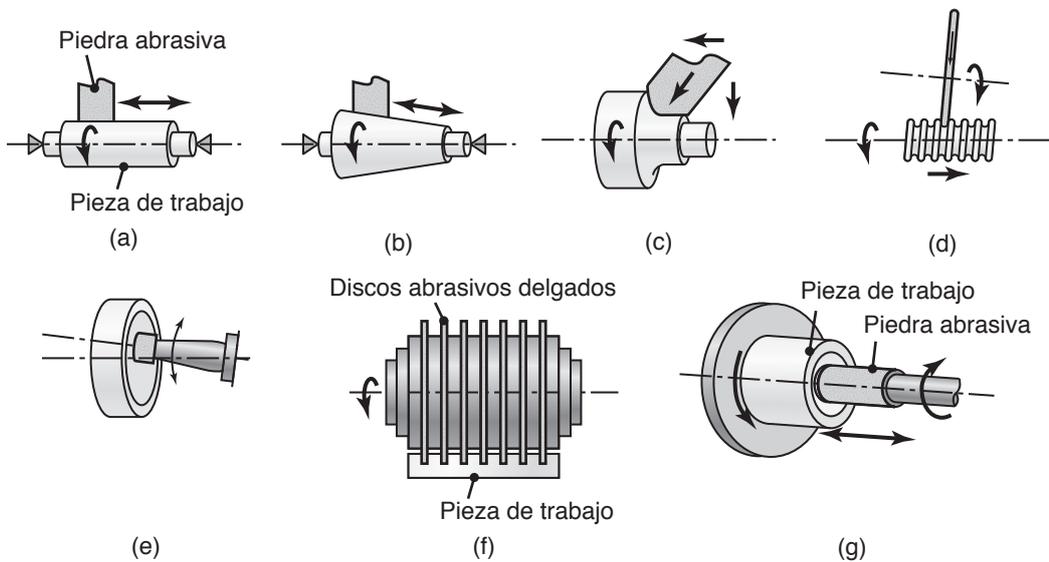


FIGURA 26.3 Tipos de piezas de trabajo y operaciones de rectificado comunes; (a) superficies cilíndricas; (b) superficies cónicas; (c) chaflanes en un eje; (d) perfiles helicoidales; (e) forma cóncava; (f) tronzado o ranurado con ruedas delgadas y (g) rectificado interior.

26.2 Abrasivos y abrasivos aglutinados

Abrasivos de uso más común en operaciones de maquinado por abrasión:

Abrasivos convencionales

- Óxido de aluminio (Al_2O_3)
- Carburo de silicio (SiC)

Superabrasivos

- Nitruro de boro cúbico (BNc)
- Diamante

Como se dijo en el capítulo 8, estos abrasivos son mucho más duros que los materiales de corte convencionales, como se ve al comparar las tablas 22.1 y 26.1 (vea también la figura 2.15). El nitruro de boro cúbico y el diamante se clasifican como superabrasivos debido a que son los dos materiales más duros que se conocen.

Además de la dureza, una característica importante de los abrasivos es su **friabilidad**, que se define como la capacidad de los granos abrasivos para fracturarse en partes más pequeñas. Esta propiedad les da sus características de **autoafilado**, esencial para mantener el filo durante el uso. Una friabilidad alta del abrasivo indica poca tenacidad o baja resistencia a la fractura. Así, un grano abrasivo muy friable se fragmenta con mayor rapidez cuando se le somete a las fuerzas del rectificado que otro con baja friabilidad. Por ejemplo, el óxido de aluminio tiene una menor friabilidad que el carburo de silicio, y por tanto una tendencia menor a fragmentarse.

La **forma** y **tamaño** del grano abrasivo también afecta su friabilidad. Por ejemplo, los granos como **bloque** que son análogos a un ángulo de ataque negativo en las herramientas de corte de un solo punto (como se observa en la figura 21.3), son menos friables que los de aspecto menos parecido a un bloque o lámina. Además, debido a que la probabilidad de que haya defectos

TABLA 26.1

Rangos de dureza Knoop de distintos materiales y abrasivos	
Vidrio común	350-500
Pedernal, cuarzo	800-1100
Óxido de circonio	1000
Aceros endurecidos	700-1300
Carburo de tungsteno	1800-2400
Óxido de aluminio	2000-3000
Nitruro de titanio	2000
Carburo de titanio	1800-3200
Carburo de silicio	2100-3000
Carburo de boro	2800
Nitruro de boro cúbico	4000-5000
Diamante	7000-8000

disminuye a medida que se reduce el tamaño de los granos, los más pequeños son más fuertes y menos friables que los grandes, fenómeno conocido como *efecto del tamaño* (vea también la sección 26.3).

Tipos de abrasivo. Los abrasivos que es común encontrar en la naturaleza son la *hercinita*, *corundo* (alúmina), *cuarzo*, *granate* y *diamante*. Debido a que en su estado natural estos abrasivos por lo general contienen impurezas y poseen propiedades no uniformes, su rendimiento como abrasivos es inconsistente y poco confiable; en consecuencia, los abrasivos se han obtenido *sintéticamente* durante muchos años.

- **Óxido de aluminio** Se elaboró por primera vez en 1893 y se produce fundiendo bauxita, limaduras de hierro y carbón de coque. Los óxidos de aluminio fundidos se clasifican como *oscuros* (menos friables), *blancos* (muy friables) o de *monocristal*.
- **Gel sembrado** Se presentó por primera vez en 1987 y es la forma más pura de *óxido de aluminio no fundido*. También se le conoce como *cerámico de óxido de aluminio* y tiene un tamaño de grano de $0.2 \mu\text{m}$ (un cabello humano grueso mide alrededor de $200 \mu\text{m}$), el cual es mucho menor que otros tipos de granos abrasivos de uso común. Estos granos están *aglomerados* (por calentamiento sin fusión, vea la sección 17.4) para formar tamaños más grandes. Debido a que son más duros que la alúmina fundida y tienen una fiabilidad relativamente mayor, los geles sembrados mantienen sus filos y son especialmente efectivos con los materiales difíciles de rectificar.
- **Carburo de silicio** Fue descubierto en 1891 y está hecho de arena de silicio y coque de petróleo. Los carburos de silicio se clasifican como *negro* (menos friable) o *verde* (más friable), y por lo general tienen una friabilidad mayor que el óxido de aluminio; por lo cual tienen una tendencia mayor a fracturarse y mantenerse afilados.
- **Nitruro de boro cúbico** Se desarrolló por primera vez en la década de 1970; sus propiedades y características se describen en las secciones 8.2.3 y 22.7.
- **Diamante** Conocido también como *diamante sintético* o *industrial*, se utilizó por vez primera como abrasivo en 1955; sus propiedades y características se describen en las secciones 8.7 y 22.9.

Tamaño del grano abrasivo. En su uso en operaciones de manufactura, por lo general los abrasivos son muy pequeños en comparación con el tamaño de las herramientas e insertos de corte descritos en los capítulos 21 y 22. Tienen aristas afiladas, por lo que permiten la remoción de cantidades muy pequeñas de material de la superficie de la pieza de trabajo, lo que resulta en un acabado muy fino de la superficie y en una exactitud dimensional excelente.

El tamaño de un grano abrasivo se identifica con un **número de grano**, lo cual es una función del tamaño de la malla que puede atravesar, de manera que cuanto más pequeño sea el grano, mayor será el número. Por ejemplo, un número de grano 10 generalmente es considerado muy grueso, el 100 es fino y el 500 es muy fino. La lija de papel y la de tela también se identifican de este modo, como puede verse con facilidad al leer el número de grano impreso al reverso de una lija o tela abrasiva.

Compatibilidad del abrasivo versus el material de la pieza de trabajo. Igual que al seleccionar los materiales de la herramienta de corte, la *afinidad* de un grano abrasivo con el material de la pieza de trabajo es una consideración importante. Cuanto menos reactivos sean los dos materiales, menores serán el desgaste y la pérdida de filo de los granos durante el rectificado, lo que hará que la operación sea más eficiente y cause menos daño a la superficie de la pieza de trabajo (vea los detalles en la sección 26.3.1). Por ejemplo, por su afinidad química, el diamante (que es una forma de carbono) no se puede usar para rectificar aceros, ya que se disuelve en hierro a las altas temperaturas

que se generan durante el rectificado. Las siguientes recomendaciones se hacen con objeto de seleccionar abrasivos:

- **Óxido de aluminio:** aceros al carbono, aleaciones de hierro y aleaciones de aceros.
- **Carburo de silicio:** metales no ferrosos, hierros fundidos, carburos, cerámicos, vidrio y mármol.
- **Nitruro de boro cúbico:** aceros y hierros fundidos con una dureza por arriba de 50 HRC y aleaciones de alta temperatura.
- **Diamante:** cerámicos, carburos y ciertos aceros endurecidos en los que la dureza del diamante es más significativa que su reactividad con el carbono del acero.

26.2.1 Piedras abrasivas

Es común que cada grano abrasivo remueva sólo una cantidad muy pequeña de material a la vez; en consecuencia, las tasas de remoción de material muy altas sólo pueden obtenerse si un gran número de dichos granos actúan juntos. Esto se logra con el empleo de **abrasivos aglutinados**, por lo general en forma de una piedra abrasiva en la cual los granos abrasivos están distribuidos y orientados de manera aleatoria.

Como se ilustra esquemáticamente en la figura 26.4, los granos abrasivos en una piedra abrasiva se mantienen juntos por acción de un **material aglutinante** (sección 26.2.2), el cual actúa como fijador o enlace entre los granos. En los abrasivos aglutinados, la *porosidad* es esencial para dar lugar a las virutas que se van a producir, pues de otro modo no habría espacio para ellas y eso interferiría gravemente con la operación de rectificado. La porosidad se nota si se observa la superficie de una piedra abrasiva con una lente de aumento.

Hoy se cuenta con una gran variedad de tipos y tamaños de piedras abrasivas. En la figura 26.5 se muestran algunos de los tipos de piedras abrasivas de uso más común para los abrasivos convencionales; en la figura 26.6 aparecen piedras superabrasivas. Note que debido a su alto costo sólo se utiliza un pequeño volumen de material superabrasivo en la periferia de estas ruedas.

Los abrasivos aglutinados se designan con un sistema estandarizado de letras y números que indican el tipo de abrasivo, tamaño de grano, grado, estructura y tipo de aglutinante. La figura 26.7 muestra el sistema de designación para los abrasivos aglutinados de óxido de aluminio y carburo de silicio; en la figura 26.8 se ilustra el sistema de designación para los abrasivos de diamante y el nitruro de boro cúbico.

El costo de las piedras abrasivas depende de su tipo y tamaño. Las pequeñas (de hasta 25 mm, o 1 pulg de diámetro) cuestan aproximadamente de \$2 a \$15 dólares estadounidenses para abrasivos convencionales; de \$30 a \$100 para diamante y de

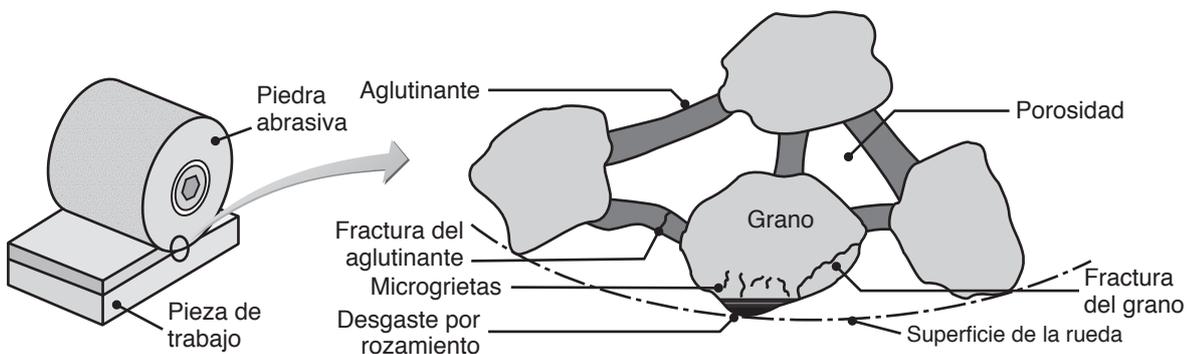


FIGURA 26.4 Ilustración esquemática de un modelo físico de una piedra abrasiva que muestra su estructura y patrones de desgaste y fractura.

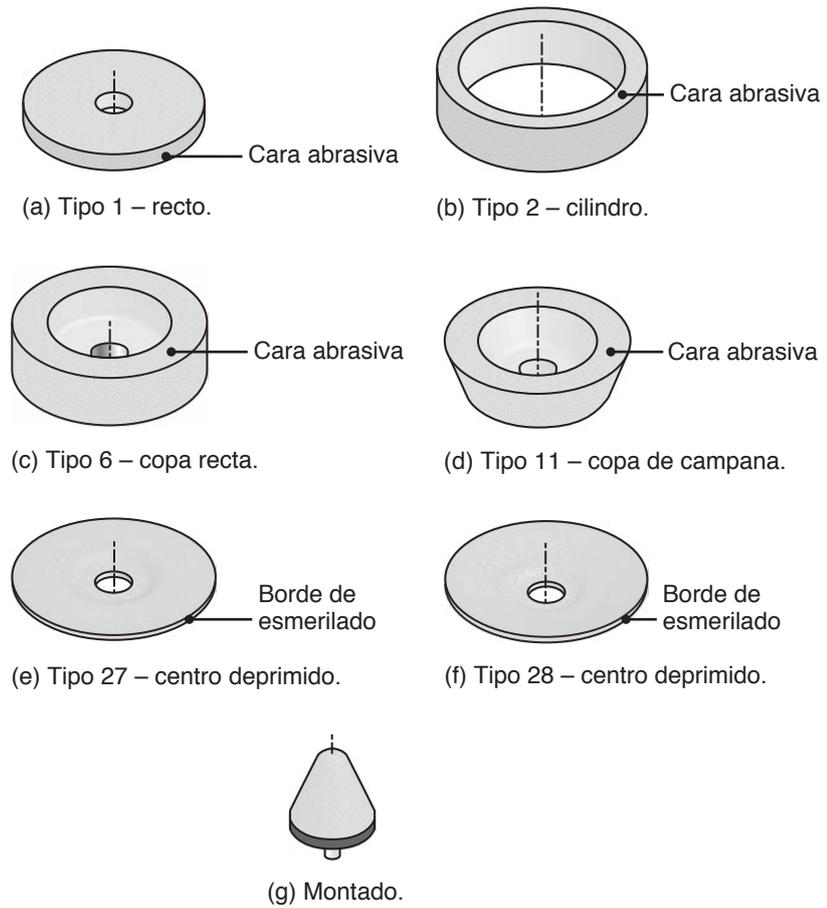


FIGURA 26.5 Tipos comunes de piedras abrasivas hechas con abrasivos convencionales; observe que cada piedra tiene una cara abrasiva específica; rectificar sobre otras superficies es inadecuado e inseguro.

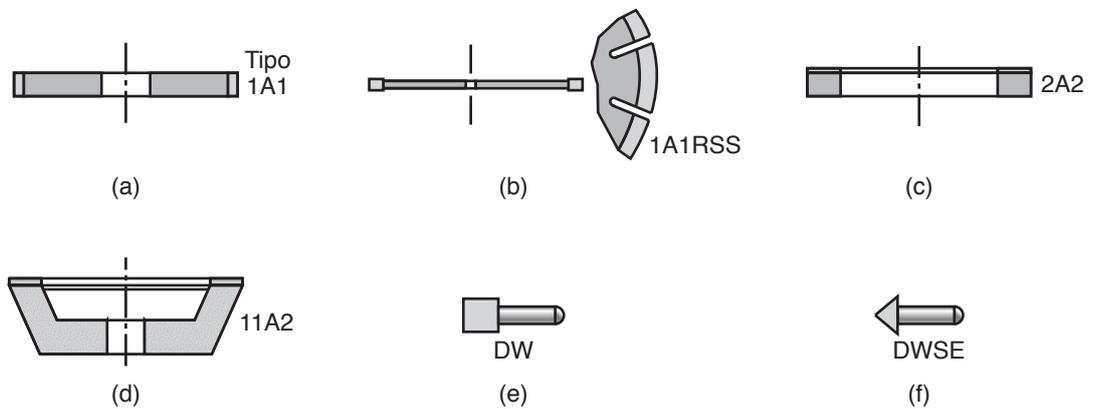


FIGURA 26.6 Ejemplos de configuraciones de piedra superabrasiva; las regiones anulares (bordes) son superficies de rectificado superabrasivas y la piedra en sí (núcleo) por lo general está hecha de metal o materiales compósitos. Los materiales aglutinadores para los superabrasivos son (a), (d) y (e) resinoide, metal o vitrificado; (b) metal; (c) vitrificado y (f) resinoide.

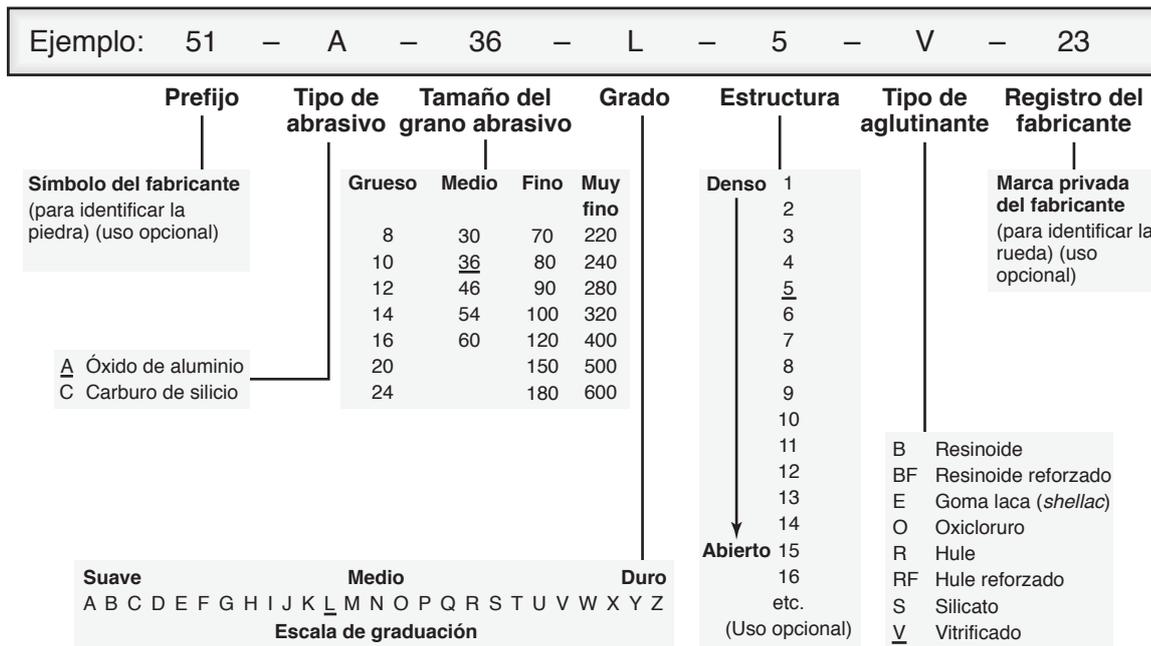


FIGURA 26.7 Sistema de designación estándar para abrasivos aglutinados de óxido de aluminio y de carburo de silicio.

\$50 a \$300 para ruedas de nitruro de boro cúbico. Una piedra grande de alrededor de 500 mm de diámetro y 250 mm de ancho (20 pulg × 10 pulg), cuesta \$500 para abrasivos convencionales, de \$5000 a \$8000 para diamante, y \$20 000 para nitruro de boro cúbico.

26.2.2 Tipos de aglutinantes

Los tipos comunes de aglutinantes que se usan para los abrasivos son los siguientes:

Vitrificado. También llamados *aglutinantes cerámicos*, *aglutinantes vitrificados* (del latín *vitrum*, vidrio; sección 8.4), constituyen el material más común y de mayor uso. Las materias primas consisten en feldespato (un mineral cristalino) y arcillas. Se mezclan con los abrasivos, se humedecen y moldean a presión en forma de piedras de rectificar. Después, estas piedras “verdes”, parecidas a las piezas obtenidas con metalurgia de polvos (capítulo 17), se hornean lentamente a una temperatura alrededor de 1250 °C (2300 °F) para fundir el vidrio y desarrollar resistencia estructural. Luego las ruedas se enfrían despacio (para evitar la fractura térmica ocasionada por gradientes de temperatura), se les da acabado a su tamaño, reciben la inspección de calidad y exactitud dimensional y se someten a pruebas para detectar cualesquiera defectos.

Las piedras con aglutinantes vitrificados son fuertes, rígidas y resistentes a aceites, ácidos y agua; sin embargo son frágiles y carecen de resistencia al choque mecánico y térmico. Para mejorar su resistencia durante el uso, estas piedras también se hacen con placas o copas de acero para dar un mejor apoyo estructural de los abrasivos aglutinados. El color de la piedra abrasiva se puede modificar agregando varios elementos durante su manufactura, de modo que las ruedas pueden tener un código de colores para usarlas con materiales específicos de la pieza de trabajo, como ferrosos, no ferrosos y cerámicos.

Resinoides. Los materiales aglutinantes resinoides son *resinas termoestables* y están disponibles en una amplia gama de composiciones y propiedades (secciones 7.4 y 7.7).

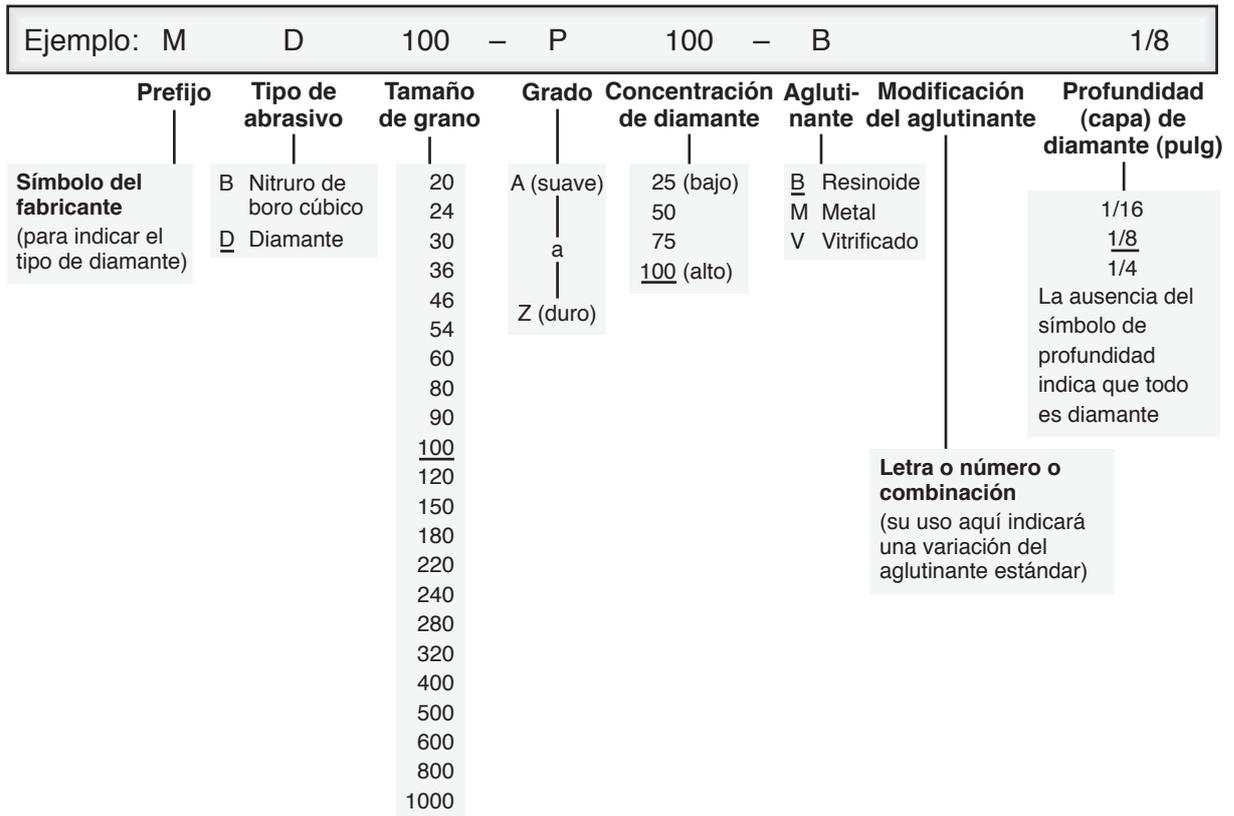


FIGURA 26.8 Sistema de designación estándar para abrasivos aglutinados de nitruro de boro cúbico y diamante.

Debido a que el aglutinante es un compuesto orgánico, las piedras con *aglutinantes resinosos* también se llaman **piedras orgánicas**. La técnica de manufactura para producirlas consiste básicamente en (a) mezclar el abrasivo con resinas y aditivos fenólicos líquidos o en polvo, luego (b) comprimir la mezcla a la forma de una piedra abrasiva y (c) curarla a temperaturas alrededor de 175 °C (350 °F) para fijar el aglutinante. Además de la compresión, el *moldeo por inyección* también se emplea para manufacturar piedras de rectificado (vea las secciones 17.3 y 19.3).

Debido a que el módulo de elasticidad de las resinas termoestables es menor que el de los vidrios (vea la tabla 2.2), las piedras de resinoide son más flexibles que las vitrificadas. Las *poliamidas* (sección 7.7) también se usan como material aglutinante en sustitución de la resina fenólica; son más robustas y resistentes a altas temperaturas.

Piedras reforzadas. Es común que estas piedras consten de una o más capas de *tejido de fibra de vidrio* (sección 8.4.2) de varios tamaños de malla. En esta estructura laminada, la fibra de vidrio proporciona refuerzo al retardar la desintegración de la piedra, en lugar de mejorar su resistencia, ante una fractura o rotura por cualquier razón durante su uso. Las piedras resinosas de gran diámetro pueden tener más apoyo si se usan uno o más anillos internos, hechos de barras de acero cilíndricas insertadas durante el moldeo de la piedra.

Termoplástico. Además de las resinas termoestables, en las piedras abrasivas también se usan aglutinantes termoplásticos (sección 7.3). Hay piedras con abrasivos de gel sólido aglutinados con termoplásticos.

Hule. La matriz más flexible que se usa en las piedras abrasivas es el hule (sección 7.9). El proceso de manufactura consiste en (a) mezclar caucho, azufre y los granos del abrasivo; (b) laminar la mezcla para formar placas; (c) cortar discos de diferentes diámetros y (d) calentar los discos bajo presión para vulcanizar el caucho. De esta manera se pueden hacer discos delgados (llamados *hojas de corte*) que se emplean como sierras para operaciones de corte.

Metal. Con técnicas de metalurgia de polvos, los granos abrasivos, por lo general diamante o nitruro de boro cúbico, están aglutinados a la periferia de una pieza metálica a profundidades de 6 mm (0.25 pulg) o menos, como se ilustra en la figura 26.5. El aglutinante metálico se fija a presión y con temperatura. La pieza en sí (el núcleo) puede ser de aluminio, bronce, acero, cerámicos o materiales compósitos, lo que depende de requerimientos como resistencia, rigidez y estabilidad dimensional. Las piedras superabrasivas pueden construirse en *capas*, de modo que una sola capa de abrasivo se adhiere o fija a una pieza metálica con la forma particular deseada. Las piedras en capas son de más bajo costo y se usan para cantidades pequeñas de producción.

26.2.3 Grado y estructura de la rueda

El *grado* de un abrasivo aglutinado es una medida de la resistencia del aglutinante, inclusive del tipo y de la cantidad de material aglutinante presente en la piedra abrasiva. Debido a que la resistencia y la dureza están directamente relacionadas (vea la sección 2.6.2), también se hace referencia al grado como una medida de la **dureza** de un abrasivo aglutinado. Entonces, por ejemplo, una piedra dura tiene un aglutinante más fuerte o una cantidad mayor de éste entre sus granos que una piedra suave.

La *estructura* de un abrasivo aglutinado es una medida de su *porosidad* (el espacio entre los granos, como se aprecia en la figura 26.4). Los rangos de la estructura van de *densa* a *abierta*, como se aprecia en la figura 26.7. Recuerde que es esencial que haya cierta porosidad para dar lugar a las virutas del rectificado, de otro modo interferirán con la operación.

26.3 Proceso de rectificado

Rectificar es un proceso de remoción de virutas que usa un grano abrasivo individual como herramienta de corte (figura 26.9a). Las principales diferencias entre la acción de un grano abrasivo y la de una herramienta de corte de un solo punto se resumen como sigue:

- Los granos abrasivos individuales tienen *formas irregulares* (figura 26.1) y están espaciados al azar a lo largo de la periferia de la piedra abrasiva (figura 26.10).
- El ángulo de ataque promedio de los granos es muy negativo, generalmente de -60° o menor; en consecuencia, las virutas del rectificado sufren una deformación plástica mucho mayor que en otros procesos de maquinado (vea la sección 21.2).
- Las posiciones radiales de los granos (sobre la superficie de la periferia de una piedra abrasiva) varían, por lo que no todos los granos están activos durante el rectificado.
- Las velocidades de la superficie de las piedras de rectificado (equivalentes a las velocidades de corte) son muy grandes, normalmente de 20 a 30 m/s (4000 a 6000 pies/min), y llegan a ser tan altas como 150 m/s (30 000 pies/min) en el rectificado de alta velocidad, que utiliza piedras especialmente diseñadas y manufacturadas.

El proceso de rectificado y sus parámetros se puede observar mejor en la operación de *rectificado superficial*, que se ilustra esquemáticamente en la figura 26.11. Una piedra

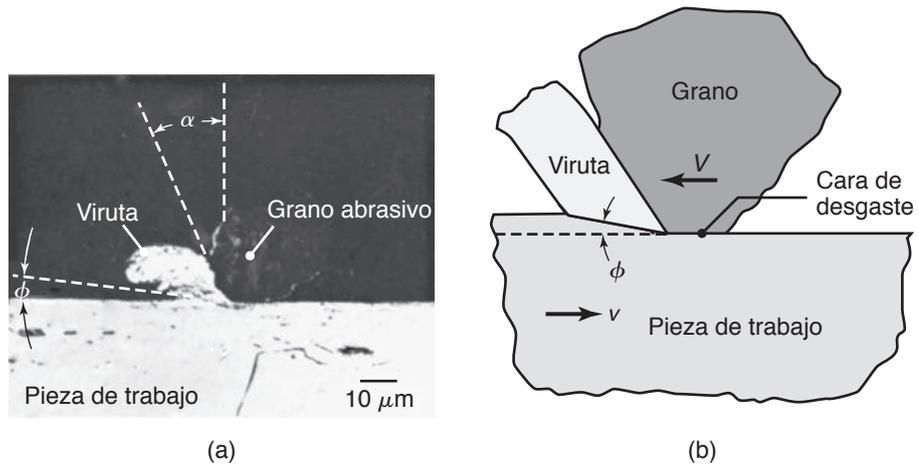


FIGURA 26.9 (a) Viruta producida por rectificado con un solo grano abrasivo; observe el gran ángulo de ataque negativo del grano. (b) Ilustración esquemática de la formación de viruta por un grano abrasivo con cara de desgaste; observe el ángulo de ataque negativo del grano y el pequeño ángulo cortante. Fuente: (a) Tomado de M. E. Merchant.

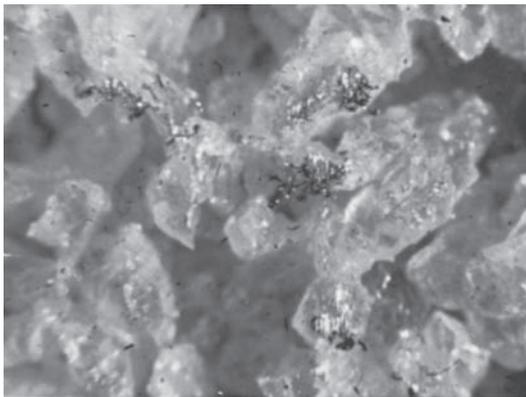


FIGURA 26.10 Superficie de una piedra abrasiva (A46-J8V) que muestra granos abrasivos, porosidad de la rueda, caras de desgaste en los granos y virutas de metal de la pieza de trabajo adheridas a los granos; observe la distribución y forma aleatorias de los granos abrasivos. Aumento: 50x.

abrasiva recta (figura 26.5a), con un diámetro D , remueve una capa de metal a una profundidad d (llamada **profundidad de corte de la piedra**). Un grano individual de la periferia de la piedra se mueve a una velocidad tangencial de V , en tanto que la pieza lo hace a una velocidad de v . Cada grano abrasivo produce una pequeña viruta, la cual tiene un *espesor no deformado* (**profundidad de corte del grano**), t , y una *longitud no deformada*, l .

En la figura 26.12 se muestran virutas comunes de las operaciones de rectificado. Observe que son delgadas y largas, igual que en el maquinado. A partir de las relaciones geométricas, se puede demostrar que la longitud de la viruta sin deformar en la superficie rectificada (figura 26.11) se obtiene con la ecuación

$$l = \sqrt{Dd} \tag{26.1}$$

y el espesor de la viruta no deformada, t , es

$$t = \sqrt{\left(\frac{4v}{VCr}\right) \sqrt{\left(\frac{d}{D}\right)}}, \tag{26.2}$$

donde C es el número de puntos de corte por unidad de área de la periferia de la piedra abrasiva. Por lo general, se estima que C está en el rango de 0.1 a 10 por mm^2 (10^2 a 10^3 por pulg^2). La cantidad r es la razón del ancho de la viruta al espesor no deformado de ésta, y tiene un valor estimado comúnmente entre 10 y 20.

Como ejemplo, l y t pueden calcularse para los siguientes parámetros de proceso: sean $D = 200$ mm, $d = 0.05$ mm, $v = 30$ m/min y $V = 1800$ m/min. Aplicando las fórmulas anteriores se obtiene

$$l = \sqrt{(200)(0.05)} = 0.32 \text{ mm} = 0.13 \text{ pulg.}$$

Si suponemos que $C = 2$ por mm^2 y que $r = 15$, se obtiene

$$t = \sqrt{\frac{(4)(30)}{(1800)(2)(15)}} \sqrt{\frac{0.05}{200}} = 0.006 \text{ mm}$$

$$= 0.00025 \text{ pulg.}$$

Debido a la deformación plástica ocurrida durante la formación de viruta, la viruta real será más corta y gruesa que los valores calculados (vea las figuras 26.9 y 26.12). Observe en este ejemplo que las dimensiones de la viruta del rectificado suelen ser mucho más pequeñas que las que comúnmente se obtienen en las operaciones de corte de metal, como se describe en el capítulo 21.

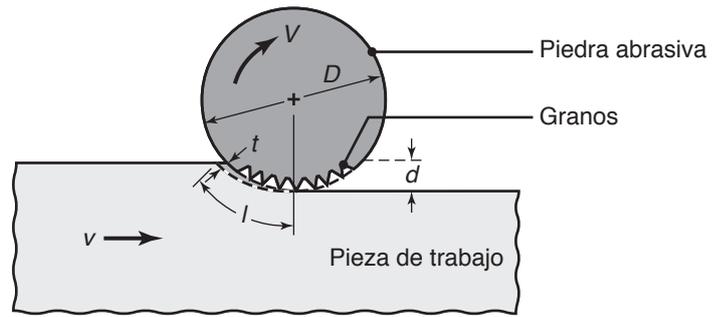


FIGURA 26.11 Ilustración esquemática del proceso de rectificado de una superficie, donde se aprecian algunas variables de la operación; la figura muestra el rectificado convencional (hacia arriba).

Fuerzas en el rectificado. El conocimiento de las fuerzas que se ejercen durante el rectificado es esencial para lo siguiente:

- Estimar los requerimientos de potencia.
- Diseñar rectificadoras así como sus dispositivos y accesorios para sujetar el trabajo.
- Determinar las deflexiones que sufren tanto la pieza de trabajo como la rectificadora, las deflexiones perjudican la exactitud dimensional y son especialmente críticas en el rectificado de precisión y ultraprecisión.

Si se supone que la fuerza de corte en el grano es proporcional al área de la sección transversal de la viruta no deformada, se puede demostrar que la **fuerza en el grano** (que actúa de manera tangencial a la piedra abrasiva) es una función de las variables del proceso:

$$\text{Fuerza en el grano} \propto \left(\frac{v}{V} \sqrt{\frac{d}{D}} \right) (\text{UTS}) \tag{26.3}$$

Se puede demostrar que por lo pequeño de las dimensiones involucradas, las fuerzas en el rectificado suelen ser mucho menores que las que suceden en las operaciones de maquinado descritas en los capítulos 23 y 24. Las fuerzas en el rectificado deben mantenerse bajas con objeto de evitar la distorsión y para mantener una buena exactitud dimensional de la pieza de trabajo.



(a) (b) (c)

FIGURA 26.12 Virutas comunes, o *limaduras*, de operaciones de rectificado. (a) Limadura procedente del rectificado de un trozo convencional de broca HSS; (b) limaduras de una pieza de trabajo de carburo de tungsteno con una piedra de diamante; (c) limaduras de hierro fundido que muestran un glóbulo fundido entre ellas. *Fuente:* Cortesía de J. Badger.

TABLA 26.2

Material de la pieza de trabajo	Dureza	Energía específica	
		W-s/mm ³	hp-min/pulg ³
Aluminio	150 HB	7-27	2.5-10
Hierro fundido (clase 40)	215 HB	12-60	4.5-22
Acero al bajo carbono (1020)	110 HB	14-68	5-25
Aleación de titanio	300 HB	16-55	6-20
Acero grado herramienta (T15)	67 HRC	18-82	6.5-30

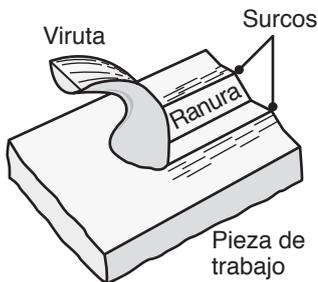


FIGURA 26.13 Formación de viruta y surco en la superficie de la pieza de trabajo, con un grano abrasivo.

Energía específica. La energía disipada en la producción de una viruta en el rectificado consiste en la energía requerida para lo siguiente:

- *Deformación plástica* en la formación de viruta.
- *Surcos*, como lo ilustra la figura 26.13 en las partes altas formadas.
- *Fricción*, causada por el frotamiento del grano abrasivo en la superficie de la pieza de trabajo.

En la figura 26.9b, observe que después de cierto uso, los granos en la periferia de la piedra abrasiva desarrollan una **cara de desgaste**, fenómeno parecido al desgaste en el flanco de las herramientas de corte que se ilustra en la figura 21.15. El aplanamiento por desgaste se talla continuamente a lo largo de la superficie, disipa energía (debido a la fricción) y por ello hace que la operación de rectificar sea menos eficiente.

La **energía específica** se define en el rectificado como la energía por unidad de volumen del material de la superficie de la pieza de trabajo, y se muestra en la tabla 26.2. Observe que los niveles de energía son mucho mayores que los de las operaciones de maquinado (tabla 21.2). Esta diferencia se atribuye a factores como la presencia de una cara de desgaste, grandes ángulos de ataque negativos en los granos abrasivos (lo que requiere más energía, sección 21.3) y una posible contribución del efecto del tamaño (cuanto más pequeña sea la viruta, mayor será la energía requerida para producirla; sección 1.5.1). Asimismo, se ha observado que con una lubricación eficaz la energía específica en el rectificado se reduce en un factor de cuatro o más.

EJEMPLO 26.1 Fuerzas al rectificar una superficie

Dado: Suponga que se lleva a cabo una operación de rectificado de una superficie de acero al bajo carbono con una piedra abrasiva de diámetro $D = 10$ pulg, que gira a $N = 4000$ rpm, y un ancho de corte de $w = 1$ pulg. La profundidad de corte es $d = 0.002$ pulg y la tasa de avance de la pieza de trabajo, v , es de 60 pulg/min.

Se solicita: El cálculo de la *fuerza del rectificado* (la fuerza tangencial a la piedra), F_c , y del *esfuerzo cortante* (la fuerza normal para la superficie de la pieza de trabajo), F_n , utilizando los datos de la energía específica.

Respuesta: La tasa de remoción de material (MRR) se determina como sigue:

$$\text{MRR} = d w v = (0.002)(1)(60) = 0.12 \text{ pulg}^3/\text{min}.$$

La potencia consumida está dada por la ecuación

$$\text{Potencia} = (u)(\text{MRR}),$$

donde u es la energía específica, obtenida de la tabla 26.2 (vea también la sección 21.3). Para acero al bajo carbono se estima que es de 15 hp-min/pulg³. Entonces,

$$\text{Potencia} = (15)(0.12) = 1.8 \text{ hp}.$$

Debido a que 1 hp = 33 000 pies-lb/min = 396 000 pulg-lb/min,

$$\text{Potencia} = (1.8)(396 000) = 712 800 \text{ pulg-lb/min}.$$

Como la potencia se define así:

$$\text{Potencia} = T\omega,$$

donde el par $T = F_c D/2$ y ω es la velocidad rotacional de la piedra, en radianes por minuto ($\nu = 2\pi N$). Entonces, se deduce que

$$712\,800 = (F_c) \left(\frac{10}{2} \right) (2\pi)(4000),$$

por lo que $F_c = 5.7$ lb. El esfuerzo cortante, F_n , se calcula directamente; sin embargo, también se puede estimar al observar en datos experimentales a partir de la bibliografía técnica que es alrededor de 30% más grande que la fuerza de corte, F_c . En consecuencia,

$$F_n = (1.3)(5.7) = 7.4 \text{ lb.}$$

Temperatura. El aumento de temperatura en el rectificado es una consideración importante, porque:

- Puede perjudicar las propiedades de la superficie de la pieza de trabajo, inclusive con cambios metalúrgicos.
- La mayor temperatura llega a ocasionar tensiones residuales en la pieza de trabajo.
- Los gradientes de temperatura en la pieza de trabajo causan distorsión debido a la expansión térmica y la contracción de la superficie de trabajo, lo que dificulta el control de la exactitud de las dimensiones.

En el rectificado, el *aumento de la temperatura de la superficie* (ΔT) se relaciona con las variables del proceso por medio de la siguiente expresión:

$$\Delta T \propto D^{1/4} d^{3/4} \left(\frac{V}{\nu} \right)^{1/2}. \quad (26.4)$$

Así, la temperatura se incrementa al aumentar la profundidad de corte, d , el diámetro de la piedra abrasiva, D , y la velocidad de la piedra, V , y disminuye si aumenta la velocidad de la pieza de trabajo, ν . Observe que en esta ecuación la profundidad de corte tiene el mayor exponente; por consiguiente, tiene la máxima influencia en la temperatura.

Aunque las *temperaturas pico* durante el rectificado pueden llegar a 1600 °C (3000 °F), el tiempo involucrado en la producción de viruta es de microsegundos, por lo que la viruta que se produce puede estar fundida o no. Debido a que las virutas llevan gran parte del calor que se genera, igual que las que se forman en los procesos de maquinado de alta velocidad (vea la sección 25.5), sólo una pequeña fracción del calor que se produce en el rectificado se transfiere a la pieza de trabajo. Si no fuera éste el caso, sería muy difícil rectificar piezas de trabajo con exactitud dimensional suficiente y sin causarles cambios metalúrgicos.

Chispas. Las chispas que se producen cuando se rectifican metales son en realidad virutas que brillan debido a la reacción *exotérmica* (producción de calor) de las virutas calientes con el oxígeno de la atmósfera. No se producen chispas cuando se rectifica en un ambiente libre de oxígeno o si el material de la pieza de trabajo no se oxida con rapidez a temperaturas elevadas. El color, la intensidad y forma de las chispas dependen de la composición del metal que se rectifique. Hay tablas que ayudan a identificar el tipo de metal que se trabaja a partir del aspecto de las chispas. Si el calor generado durante la reacción exotérmica es suficientemente alto las chispas se pueden fundir y adquirir una forma esférica (debido a la tensión superficial) y solidificarse como partículas de metal.

Revenido. Un aumento excesivo de temperatura durante el rectificado puede ocasionar *revenido* y *reblandecimiento* de la superficie de la pieza de trabajo. Por tanto, deben seleccionarse con cuidado las variables del proceso para evitar el aumento excesivo de

temperatura. El uso de fluidos para rectificar (sección 26.4) es un medio eficaz de controlar la temperatura.

Quemado. El aumento en exceso de la temperatura durante el rectificado puede quemar la superficie de la pieza que se trabaja. Una *quemadura* se caracteriza por el color azulado de las superficies del acero trabajado, indicación de que las altas temperaturas han causado su oxidación. Una quemadura, que se detecta por medio de grabado y técnicas metalúrgicas, puede no ser cuestionable en sí misma, a menos que las capas de la superficie hubieran sufrido *transformaciones de fase* (capítulo 4). Por ejemplo, si debido a un enfriamiento rápido se forma martensita en aceros al alto carbono, recibe el nombre de *quemadura metalúrgica*, que perjudica las propiedades de la superficie de las partes terminadas y reduce su ductilidad y tenacidad.

Agrietamiento térmico. Las temperaturas elevadas al rectificar llegan a ocasionar que la superficie de la pieza que se trabaja desarrolle grietas, condición que se conoce como *agrietamiento por calor*. Las grietas suelen ser perpendiculares a la dirección del rectificado, aunque en condiciones graves también llegan a aparecer grietas paralelas. Como es de esperar, una superficie así carece de tenacidad y tiene poca resistencia a la fatiga y a la corrosión. El agrietamiento térmico también ocurre en dados durante la fundición de dados, como se describe en la sección 11.4.5.

Esfuerzos residuales. Los gradientes de temperatura en el interior de la pieza de trabajo durante el rectificado son las causas principales del desarrollo de *esfuerzos residuales*. Los fluidos para rectificar y su método de aplicación, así como parámetros del proceso como la profundidad de corte y las velocidades, influyen en gran manera en la magnitud y tipo de esfuerzos residuales. Dados los efectos adversos de los esfuerzos residuales sobre la resistencia a la fatiga, se deben seleccionar con cuidado las variables del proceso. Usualmente, los esfuerzos residuales se pueden reducir si se disminuye la velocidad de la piedra abrasiva y se incrementa la velocidad de la pieza de trabajo, proceso que se denomina *rectificado de bajo esfuerzo* o *rectificado benigno*. También se pueden usar piedras de grado suave, conocidas como piedras abrasivas de *corte libre*, para reducir dichos esfuerzos.

26.3.1 Desgaste de la piedra abrasiva

Igual que el desgaste de las herramientas de corte, el de la piedra abrasiva es una consideración importante porque perjudica la forma y exactitud dimensional de las superficies terminadas. El desgaste de las piedras abrasivas lo causan tres diferentes mecanismos: desgaste del grano por rozamiento, fractura del grano y fractura del aglutinante.

Desgaste del grano por rozamiento. En el *desgaste por rozamiento*, que es semejante al desgaste en el flanco de las herramientas de corte (vea la figura 21.15), los bordes de corte de un grano que originalmente tienen filo, lo pierden y desarrollan una *cara plana* (figura 26.9b). Este tipo de desgaste implica reacciones tanto físicas como químicas y lo causa la interacción del grano con el material de la pieza de trabajo. Estas reacciones son complejas, implican difusión, degradación química o descomposición del grano, fracturas a escala microscópica, deformación plástica y fusión.

El desgaste por rozamiento es poco cuando los dos materiales (es decir, el grano y la pieza de trabajo) son *inertes químicamente* uno respecto al otro, de forma muy parecida a lo estudiado en las herramientas de corte (vea la sección 22.1). Cuanto más inertes sean los materiales, menor es la tendencia a reaccionar y adherirse entre el grano y la pieza de trabajo. Entonces, por ejemplo, como el óxido de aluminio es relativamente inerte con respecto al hierro, su tasa de desgaste por rozamiento cuando se usa para rectificar aceros es mucho menor que la del carburo de silicio y el diamante. Por el contrario, el carburo de silicio se disuelve en el hierro, de modo que no es apropiado para rectificar aceros. El nitruro de boro cúbico es más inerte con respecto a los aceros, lo que lo hace adecuado para su uso como abrasivo.

Fractura del grano. Debido a que los granos abrasivos son frágiles, sus características de fractura en el rectificado son significativas. Si la cara plana causada por rozamiento es excesiva, el grano pierde su filo, el rectificado se vuelve ineficiente y produce temperaturas altas e indeseables. Lo ideal es que un grano sin filo se fracture o fragmente a una tasa moderada, de manera que se produzcan continuamente nuevos bordes cortadores afilados mientras se rectifica. Esta situación es equivalente a romper una pieza de gis roma, o una piedra, en dos o más pedazos con el fin de crear nuevas aristas con filo (vea la sección 26.2 acerca de la *friabilidad*).

La selección del tipo y tamaño del grano para una aplicación particular también depende de la tasa de desgaste por rozamiento. Una combinación de materiales grano-pieza de trabajo que tenga un gran desgaste por rozamiento y baja friabilidad de los granos los hace perder el filo y desarrolla una cara plana grande. En ese caso el rectificado se vuelve ineficiente y es probable que se causen daños en la superficie, como el quemado.

Fractura del aglutinante. La resistencia del aglutinante (*grado*) es un parámetro importante en el rectificado. Por ejemplo, si es demasiado fuerte los granos sin filo no se pueden desprender, lo que a su vez impide que otros granos lleguen a la circunferencia de la piedra abrasiva para entrar en contacto con la pieza de trabajo. Y al contrario, si el aglutinante es demasiado débil, los granos se desprenden con facilidad y la tasa de desgaste de la piedra aumenta. En este caso es difícil mantener la exactitud dimensional.

En general, para materiales duros se recomiendan aglutinantes suaves para reducir los esfuerzos residuales y el daño térmico en la pieza de trabajo. Las piedras de grado alto se utilizan para materiales suaves con objeto de remover grandes cantidades de material a tasas elevadas.

26.3.2 Relación de rectificado

El desgaste de la piedra abrasiva por lo general se correlaciona con la cantidad de material de la pieza de trabajo terminada por medio de un parámetro llamado *relación de rectificado*, G , definida como

$$G = \frac{\text{Volumen del material removido}}{\text{Volumen del desgaste de la piedra abrasiva}}. \quad (26.5)$$

En la práctica, las razones de rectificado varían mucho, de 2 a 200 y aún más, lo que depende del tipo de piedra, material de la pieza de trabajo, fluido para rectificar y parámetros del proceso como profundidad de corte y velocidades de la piedra abrasiva y la pieza de trabajo. Se ha demostrado que los fluidos para rectificar eficaces incrementan la razón de rectificado en un factor de 10 o más, lo que mejora mucho la vida de la piedra.

Durante el rectificado, una piedra en particular puede **trabajar suave** (es decir tener una alta tasa de desgaste) o **trabajar duro** (baja tasa de desgaste), sin que importe su grado. Observe, por ejemplo, que un lápiz común trabaja suave cuando se escribe en papel áspero, pero trabaja duro cuando se escribe en papel suave, aun cuando sea el mismo lápiz. El trabajar duro o suave es una función de la fuerza ejercida sobre el grano individual en la periferia de la piedra abrasiva. A mayor fuerza, mayor será la tendencia de los granos a fracturarse o desprenderse de la superficie de la piedra, con lo que la piedra se desgastará más y en consecuencia disminuirá la razón de rectificado.

Observe que en la ecuación (26.3), la fuerza del grano se incrementa con la resistencia del material de la pieza de trabajo, velocidad del trabajo y profundidad de corte, y disminuye con la mayor velocidad de la piedra y su diámetro; así, una piedra abrasiva trabaja suave cuando aumentan v y d o cuando disminuyen V y D . Observe también que no siempre es deseable tratar de obtener en la práctica una alta razón de rectificado (para extender la vida de la piedra), ya que las razones elevadas indican pérdida del filo del grano, con el posible daño a la superficie de la pieza de trabajo. Una razón baja es aceptable cuando el análisis técnico y económico así lo justifican.

EJEMPLO 26.2 Acción de una piedra abrasiva

Dado: Se lleva a cabo una operación de rectificado de una superficie con la piedra a velocidad constante de su eje. Suponga que la profundidad de corte, d , permanece constante y que la piedra es rehabilitada en forma periódica (vea la sección 26.3.3).

Se solicita: ¿La piedra trabajará suave o duro a medida que se desgaste con el tiempo?

Respuesta: En relación con la ecuación (26.3), note que los parámetros que cambian con el tiempo en esta

operación son el diámetro de la piedra, D , y la velocidad de su superficie, V . A medida que D se hace más pequeño, aumenta la fuerza relativa del grano, por lo que la piedra abrasiva trabaja más suave. Para asimilar los cambios debidos a la reducción del diámetro de la piedra con el tiempo, o para tomar provisiones para usar piedras de diferentes diámetros, algunas rectificadoras están equipadas con motores con ejes de velocidad variable.

26.3.3 Afilado, ajuste y conformado de piedras abrasivas

Afilado es el proceso de (a) *acondicionar*, para producir *nuevos bordes afilados* en granos sin filo en la superficie rectificadora de una piedra, y (b) *ajustar*, para obtener de nuevo un *verdadero círculo* en una piedra que haya perdido la redondez. Es necesario afilar una piedra abrasiva cuando el desgaste por rozamiento haya sido excesivo y elimine su filo, lo que se llama **vidriado** (debido al aspecto brillante de la superficie de la piedra), o cuando la piedra quede *cargada* (vea enseguida). Para las piedras suaves, el ajuste y afilado se hacen por separado, pero para piedras más duras, como las de BNC, las dos operaciones se hacen a la vez.

La **carga** de una piedra abrasiva ocurre cuando las porosidades de su superficie (figura 26.10) se llenan o saturan con virutas de la pieza de trabajo. La carga puede ocurrir mientras se rectifican materiales suaves o por la selección inadecuada de las piedras o los parámetros del proceso. Una piedra cargada es ineficaz en el rectificado y genera mucho calor por fricción, lo que daña la superficie, además de la pérdida de exactitud en las dimensiones de la pieza de trabajo.

Las técnicas para afilar piedras abrasivas son las siguientes:

- Una *herramienta con punta de diamante* especialmente diseñada, o un *conglomerado de diamante*, se mueve a través del ancho de la cara que rectifica de una piedra abrasiva que gira y, en cada pasada, elimina una pequeña capa de la superficie de la piedra. Este método se lleva a cabo en seco o con humedad, lo que depende de si la piedra se va a utilizar seca o húmeda, respectivamente. Sin embargo, en la práctica puede ser importante el desgaste que sufra el diamante ante piedras duras y se requerirá utilizar un disco de diamante o una piedra en forma de copa.
- Se presiona manualmente contra la piedra un conjunto de *discos de acero en forma de estrella*. El material se elimina de la superficie de la piedra al triturar los granos; como resultado, este método produce una superficie irregular en la piedra y se usa solamente para operaciones de rectificado grueso, en rectificadoras de banco o pedestal.
- Pueden usarse *varillas abrasivas* para afilar piedras abrasivas, en particular si son suaves; aun cuando esta técnica no es adecuada para realizar operaciones de rectificado de precisión.
- Las técnicas para afilar piedras de diamante aglutinadas con metal implican el uso de *descarga eléctrica* y *maquinado electroquímico*, como se describe en el capítulo 27. Estos procesos erosionan capas muy delgadas del aglutinante metálico y exponen así nuevos bordes cortantes del diamante.
- El afilado para el rectificado de conformación implica *afilado por compresión* o *formado por compresión*. El proceso consiste en presionar un rodillo metálico contra la superficie de la piedra abrasiva, la cual es común que se encuentre vitrificada. El rodillo (que por lo general está hecho de acero de alta velocidad, carburo de tungsteno o carburo de boro) tiene un perfil maquinado o terminado en su periferia; por lo tanto reproduce una réplica de este perfil en la superficie de la piedra abrasiva que se va a afilar (vea la sección 26.4).

Las técnicas para afilar y la frecuencia con que se haga son importantes para la calidad, ya que afectan las fuerzas durante el rectificado y el acabado de la superficie de la pieza de trabajo. Las rectificadoras modernas controladas por computadora están equipadas con herramientas automáticas de afilado que restauran la piedra abrasiva continuamente a medida que avanza el rectificado. Es muy importante el primer contacto de la herramienta de afilado con la piedra abrasiva, ya que determina la naturaleza de la nueva superficie producida; esta acción por lo general se vigila con precisión por medio de sensores piezoeléctricos o de emisión acústica (sección 37.7). Para afilar piedras abrasivas de alta precisión también se emplean técnicas como sensores de vibración, monitores de potencia y galgas extensométricas.

Para una piedra común de óxido de aluminio, la profundidad que se elimina durante el afilado es del orden de 5 a 15 μm (200 a 600 μpulg), pero para una piedra de BNc es de 2 a 10 μm (80 a 400 μpulg). En consecuencia, los sistemas modernos de afilado tienen una resolución muy fina, de 0.25 a 1 μm (10 a 40 μpulg).

Las piedras abrasivas pueden ser *conformadas* para que se adapten a la forma que se va a obtener en la pieza de trabajo (sección 26.4). La cara rectificadora en la piedra recta del tipo 1 que se ilustra en la figura 26.5a es cilíndrica, por lo que produce una superficie plana. También pueden darse a la superficie de la piedra varias formas al afilarla (figura 26.14a). Aunque para ese propósito se han empleado plantillas, las rectificadoras modernas están equipadas con herramientas formadoras controladas por computadora.

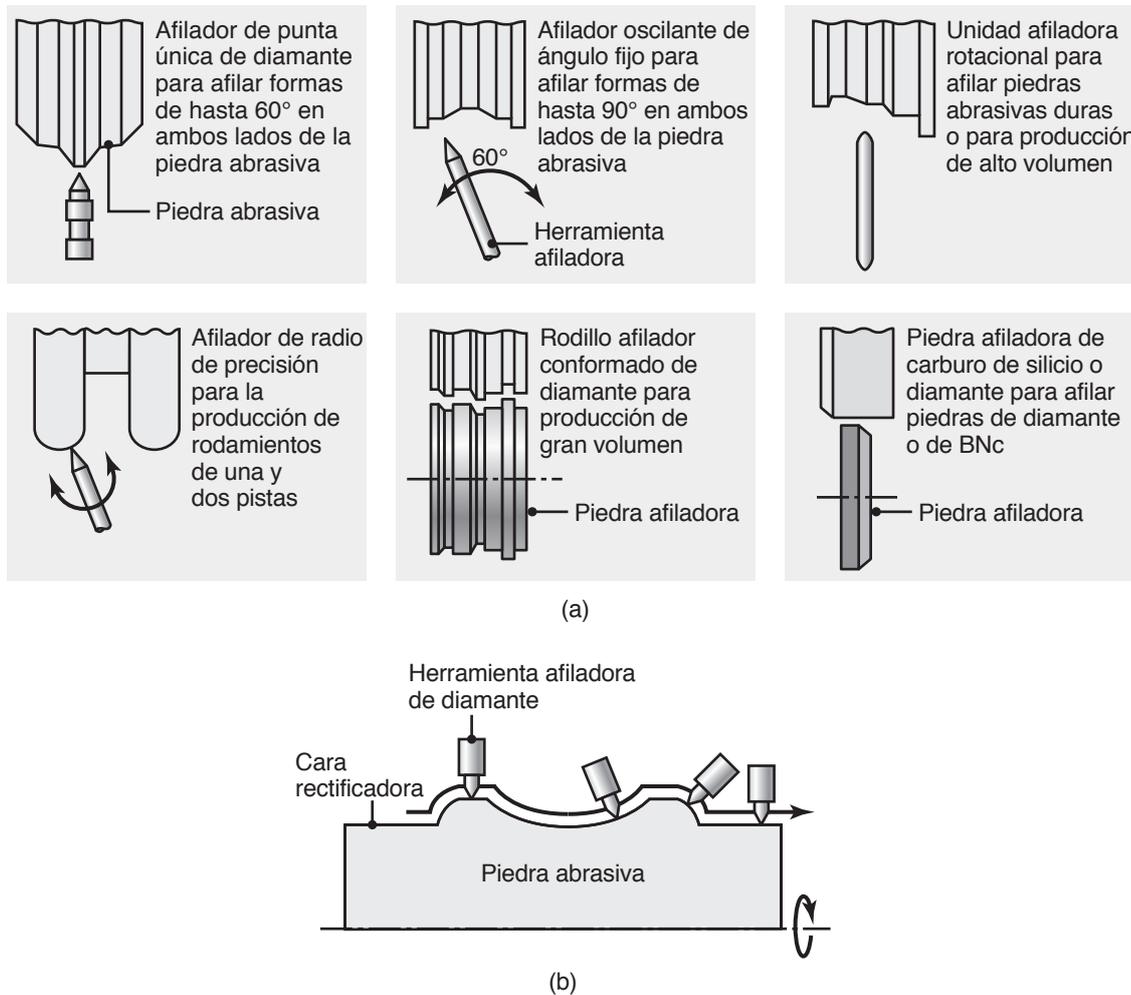


FIGURA 26.14 (a) Formas de afilar una piedra abrasiva. (b) Conformación de la cara rectificadora de una piedra al afilarla por control computarizado; observe que la herramienta afiladora de diamante permanece perpendicular a la superficie en el punto de contacto con la piedra. Fuente: Cortesía de Okuma Corporation. Impreso con permiso.

TABLA 26.3

Rangos comunes de velocidades y avances para procesos abrasivos				
Variable del proceso	Rectificado, convencional	Rectificado, avance lento	Pulido	Lustrado
Velocidad de la piedra (m/min)	1500-3000	1500-3000	1500-2400	1800-3500
Velocidad del trabajo (m/min)	10-60	0.1-1	—	—
Avance (mm/pasada)	0.01-0.05	1-6	—	—

A menos que ya se tenga la forma deseada, la herramienta de afilar hecha de diamante cruza la cara de la piedra de manera automática a lo largo de cierta trayectoria prescrita (figura 26.14b), y produce superficies muy exactas. En la figura 26.14b, observe que el eje de la herramienta afiladora de diamante permanece en posición perpendicular a la cara de la piedra abrasiva en el punto de contacto.

26.3.4 Facilidad de rectificado de los materiales y selección de la piedra abrasiva

Es difícil definir con precisión el término que se refiere a lo *rectificable* de los materiales, como lo es definir *maquinable* (sección 21.7) o *forjable* (sección 14.5). La factibilidad a ser rectificado es un indicador general de lo fácil que resulta rectificar un material e incluye algunas consideraciones como la calidad de la superficie producida, acabado e integridad de ésta, desgaste de la piedra, tiempo del ciclo de rectificado y economía general de la operación. Igual que en la maquinabilidad, la facilidad de rectificado de un material mejora mucho con la selección apropiada de los parámetros del proceso (vea la tabla 26.3), las piedras abrasivas y los fluidos para rectificar, así como con el uso de las características apropiadas de la máquina, métodos de fijación y dispositivos para sujetar el trabajo.

Actualmente están bien establecidas las prácticas para rectificar una amplia variedad de materiales metálicos y no metálicos, inclusive los nuevos desarrollados en la industria aeroespacial y otros compósitos. En varios manuales, bibliografía de fabricantes y las referencias bibliográficas de este capítulo, es posible encontrar recomendaciones específicas para seleccionar piedras abrasivas y parámetros apropiados del proceso para metales.

Rectificado de régimen dúctil. Se ha demostrado que con pasadas ligeras y máquinas con mucha rigidez y buena capacidad de sujeción, es posible producir virutas *continuas* y buena integridad de la superficie al rectificar materiales frágiles, como los cerámicos (figura 26.13), proceso conocido como *rectificado de régimen dúctil*. Este régimen es útil porque produce menos grietas en la superficie y tiene un rendimiento mejor en cuanto a la fatiga y aplicaciones con rodamientos. Es común que las virutas de cerámicos tengan un tamaño de 1 a 10 μm (40 a 400 μpulg); son más difíciles de remover de los fluidos para rectificar que las virutas metálicas, por lo que se requiere el uso de filtros finos y técnicas especiales.

26.4 Operaciones de rectificado y rectificadoras

Seleccionar un proceso de rectificado y una máquina rectificadora para una aplicación en particular depende de la forma y características de la pieza de trabajo, su tamaño, facilidad de sujeción y tasa de producción requerida (tabla 26.4). Las rectificadoras modernas están controladas por computadora y tienen características como carga y descarga automática de la pieza de trabajo, sujeción de ésta y afilado automático así como conformación de la piedra abrasiva. Las rectificadoras también están equipadas con sensores y medidores para determinar la posición relativa de las superficies de la piedra y de la pieza (vea también la figura 25.6), así como con herramientas sensibles al tacto (palpadores) con las que se puede detectar fácilmente, por ejemplo, la ruptura de la herramienta afiladora de diamante durante el ciclo de afilado.

TABLA 26.4

Características generales de los procesos de rectificado abrasivo y de rectificadoras		
Proceso	Características	Dimensiones máximas comunes, longitud y diámetro (m)*
Rectificado de superficies	Superficies planas en la mayoría de materiales; la tasa de producción depende del tamaño de la mesa y nivel de automatización; la habilidad del operador depende de la complejidad de la parte; la tasa de producción es alta en rectificadoras de mesa rotatoria y eje vertical.	Mesa recíproca L : 6 Mesa giratoria, D : 3
Rectificado cilíndrico	Piezas de trabajo redondas con diámetros escalonados; baja tasa de producción a menos que esté automatizado; habilidad de la mano de obra, de baja a media.	Pieza de trabajo, D : 0.8; rectificadoras de rodillos D : 1.8; rectificadoras universales, D : 2.5 Pieza de trabajo, D : 0.8
Sin centro	Piezas de trabajo redondas y esbeltas; tasa de producción alta; habilidad de la mano de obra, de baja a media.	
Interno	Orificios en la pieza de trabajo; tasa de producción baja; habilidad de la mano de obra, de baja a media.	Orificio, D : 2
Asentado	Orificios en la pieza de trabajo; baja tasa de producción; habilidad de la mano de obra, baja.	Husillo, D : 1.2
Lapeado	Piezas de trabajo planas, cilíndricas o curvadas; alta tasa de producción; baja habilidad de la mano de obra.	Mesa, D : 3.7
Pulido mecánico-químico	Superficies planas, por lo general se usan para semiconductores en aplicaciones de microelectrónica o MEMS; tasa de producción moderada; gran habilidad de la mano de obra.	D : 0.3
Maquinado con flujo abrasivo	Se usa para eliminar rebabas y dar acabado a geometrías complejas; baja tasa de producción; poca habilidad de la mano de obra.	D : 0.3
Maquinado ultrasónico	Orificios y cavidades de varias formas; apropiado para materiales duros y frágiles; habilidad de la mano de obra, media.	—

*Se dispone de capacidades mayores para aplicaciones especiales.

Rectificado de superficies. El *rectificado de superficies* (figura 26.15) suele implicar el rectificado de superficies planas. Es común que la pieza de trabajo se sostenga en un *plato magnético*, sujeto a la mesa de trabajo de la rectificadora (figura 26.16); los materiales no magnéticos se sujetan con tornillos de banco, platos de vacío o algunos otros accesorios. En esta operación se monta una piedra abrasiva (rueda) recta sobre el eje horizontal de la rectificadora de superficies. El rectificado en diagonal ocurre a medida que la mesa se mueve en forma recíproca longitudinalmente y el avance ocurre de manera lateral (en dirección del eje del husillo) después de cada paso.

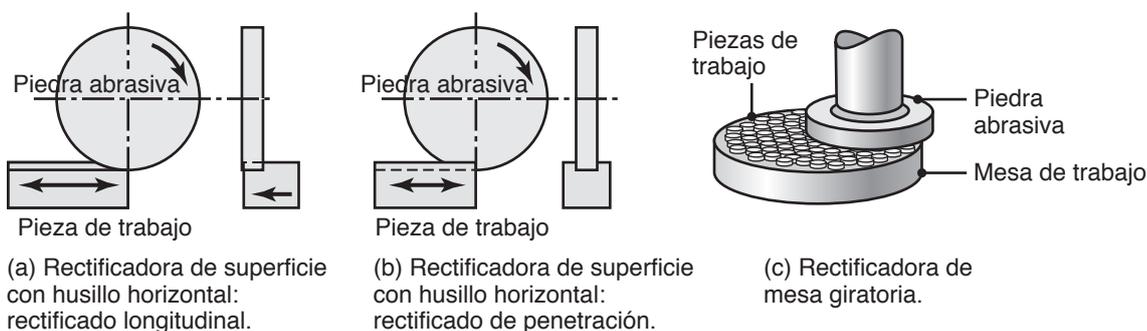


FIGURA 26.15 Ilustraciones esquemáticas de distintas operaciones de rectificado de superficie. (a) Rectificado longitudinal con rectificadora de superficie de eje horizontal. (b) Rectificado de penetración con rectificadora de superficie de eje horizontal, lo que produce una ranura en la pieza de trabajo. (c) Rectificadora de mesa rotatoria y eje vertical (también se conoce como tipo *Blanchard*).

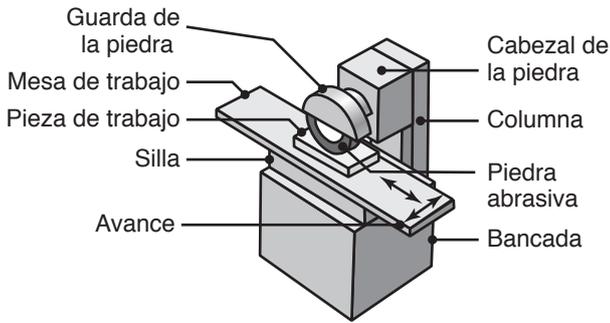


FIGURA 26.16 Ilustración esquemática de una rectificadora de superficie de husillo horizontal.

El movimiento de la piedra abrasiva puede ocurrir a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo (*rectificado longitudinal*, *rectificado a favor del avance* o *rectificado transversal*) o la piedra puede moverse en forma radial en la pieza de trabajo (rectificado de *penetración*), como es el caso cuando se rectifica una ranura (figura 26.15b). Las rectificadoras de superficie constituyen el mayor porcentaje de las que se utilizan en la industria, seguidas por las de banco (usualmente con dos piedras, una en cada extremo del husillo), cilíndricas, rectificadoras para herramientas y cortadores y rectificadoras internas, como se describen a continuación.

Además de la rectificadora de superficie que se muestra en la figura 26.16, otros tipos incluyen las de *husillo vertical* y *mesas giratorias* (conocidos como tipo *Blanchard*, figura 26.15c). Estas configuraciones permiten que se trabajen varias piezas en una sola operación. Por ejemplo, los balines de acero de los rodamientos se preparan en corridas especiales y a tasas altas de producción (figura 26.17).

En el rectificado cilíndrico, la pieza de trabajo se sujeta entre sus centros o en un plato, o se monta en una placa frontal en el cabezal de la rectificadora. Para superficies cilíndricas rectas, los ejes de rotación de la piedra y de la pieza de trabajo son paralelos y a cada uno lo mueven motores diferentes y a distintas velocidades. Las piezas de trabajo largas con dos o más diámetros también pueden trabajarse en rectificadoras cilíndricas. Igual que en el *rectificado de conformación* y en el *rectificado de penetración*, la operación también produce formas en las que la rueda se adapta a la forma de la pieza de trabajo que se va a procesar (figura 26.19).

Rectificado cilíndrico. En el *rectificado cilíndrico*, también conocido como *rectificado centrado* (figura 26.18; vea también la figura 26.3), se trabajan las superficies cilíndricas externas y los hombros de las piezas de trabajo, como rodamientos de cigüeñales, ejes, pernos y anillos de cojinetes. La pieza de trabajo cilíndrica giratoria se mueve de manera recíproca en forma lateral a lo largo de su eje para cubrir todo el ancho que se va a trabajar. En las *rectificadoras de rodillos*, para piezas de trabajo grandes y largas como cilindros para fresadoras giratorias (vea la figura 13.1), la piedra abrasiva se mueve de manera recíproca. Estas máquinas son capaces de rectificar cilindros hasta de 1.8 m (72 pulg) de diámetro.

En el rectificado cilíndrico, la pieza de trabajo se sujeta entre sus centros o en un plato, o se monta en una placa frontal en el cabezal de la rectificadora. Para superficies cilíndricas rectas, los ejes de rotación de la piedra y de la pieza de trabajo son paralelos y a cada uno lo mueven motores diferentes y a distintas velocidades. Las piezas de trabajo largas con dos o más diámetros también pueden trabajarse en rectificadoras cilíndricas. Igual que en el *rectificado de conformación* y en el *rectificado de penetración*, la operación también produce formas en las que la rueda se adapta a la forma de la pieza de trabajo que se va a procesar (figura 26.19).

Las rectificadoras cilíndricas se identifican por el diámetro y longitud máxima de la pieza de trabajo que pueden operar. En las *rectificadoras universales*, tanto la pieza de tra-

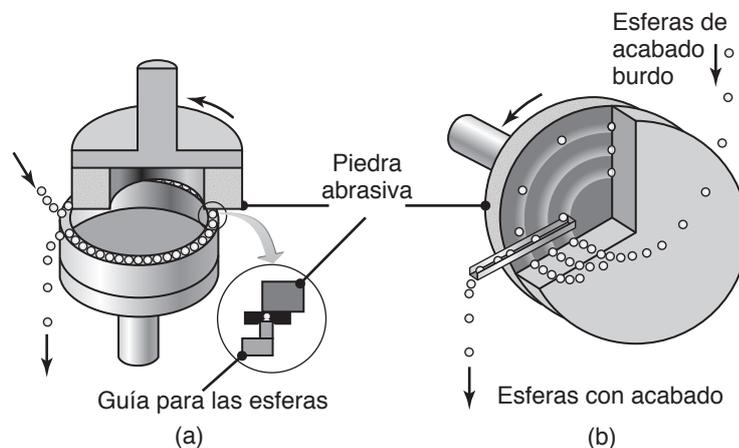


FIGURA 26.17 (a) Rectificado de desbaste de esferas de acero en una rectificadora de husillo vertical; las esferas son conducidas por un accesorio rotatorio especial. (b) Rectificado de acabado de esferas en un accesorio de ranuras múltiples; las esferas se preparan con una aproximación de 0.013 mm (0.0005 pulg) de su tamaño final.

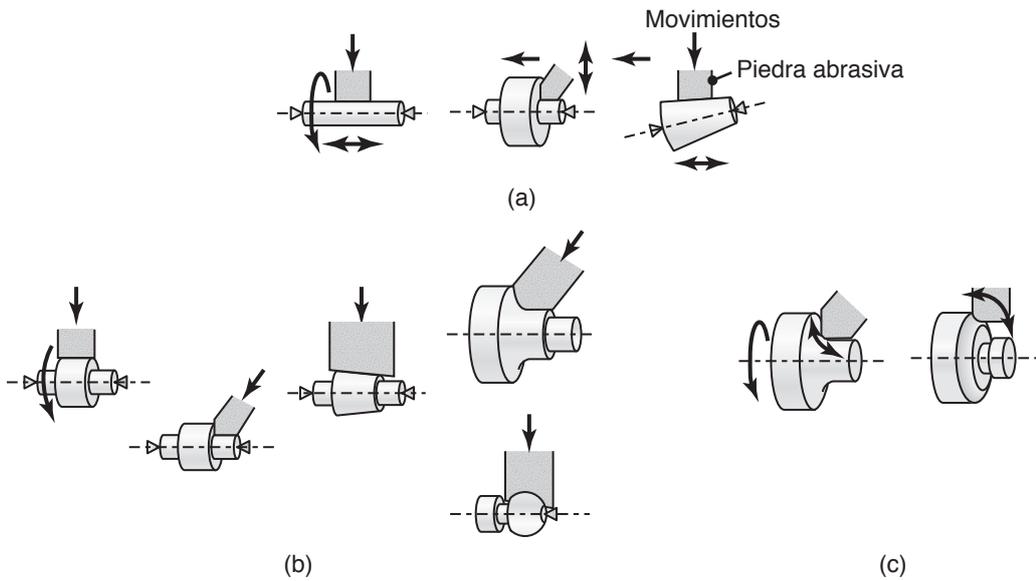


FIGURA 26.18 Ejemplos de varias operaciones de rectificado cilíndrico: (a) rectificado longitudinal; (b) rectificado de penetración y (c) rectificado de perfil. Fuente: Cortesía de Okuma Corporation. Impreso con autorización.

bajo como los ejes de la piedra se pueden mover y girar alrededor de un plano horizontal, lo que permite el rectificado de ahusamientos y otras formas.

Con el control computarizado también se pueden trabajar partes *no cilíndricas*, como levas, e igualmente se pueden procesar en piezas de trabajo giratorias. Como se ilustra en la figura 26.20, la velocidad del eje de la pieza de trabajo está sincronizada de manera que la distancia radial, x , entre la pieza de trabajo y los ejes de la piedra varíen continuamente para producir una forma en particular, como la que se ilustra en la figura.

El **rectificado de roscas** se lleva a cabo en rectificadoras cilíndricas, con piedras preparadas especialmente para que se adapten a la forma de las roscas, como se ilustra en la figura 26.21 (vea también el *rectificado sin centro*). Aunque son caras, las roscas producidas con rectificado son las

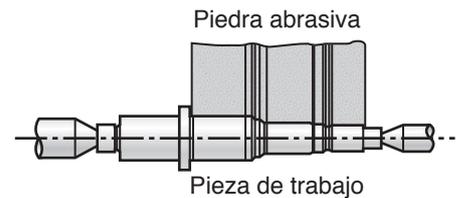


FIGURA 26.19 Rectificado de penetración de una pieza de trabajo en una rectificadora cilíndrica con la piedra adaptada a una forma en escalón.

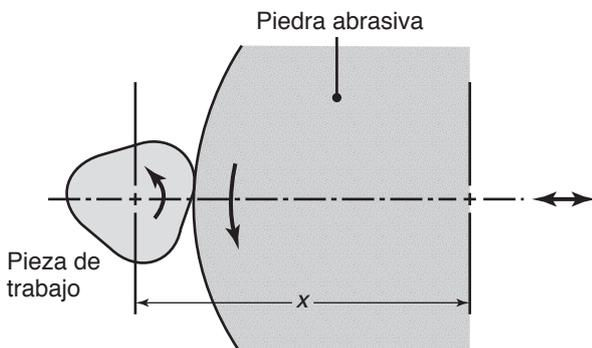


FIGURA 26.20 Ilustración esquemática del rectificado de una parte no cilíndrica en una rectificadora cilíndrica con controles por computadora para producir la forma. La rotación de la parte y la distancia x entre los centros se varían y sincronizan para rectificar la forma particular de la pieza de trabajo.

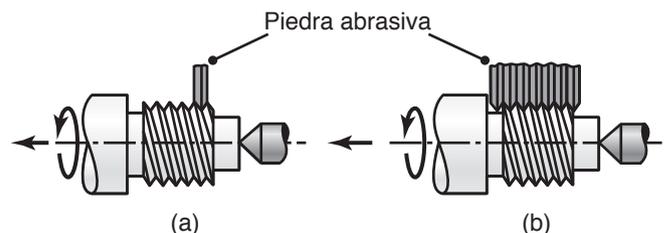


FIGURA 26.21 Rectificado de roscas (a) por rectificado longitudinal y (b) de penetración.

más exactas de cualquier proceso de manufactura y tienen un acabado muy fino de la superficie. Las aplicaciones comunes que requieren tales roscas incluyen a los mecanismos sin fin usados para hacer movimientos precisos de distintos componentes de máquinas. Los movimientos de la pieza de trabajo y de la piedra abrasiva se sincronizan para producir la cuerda de la rosca, usualmente en unos seis pasos.

EJEMPLO 26.3 Patrones del ciclo en el rectificado cilíndrico

Como en la mayoría de operaciones de rectificado, es común que en el rectificado cilíndrico la piedra realice varias pasadas a lo largo de una trayectoria para producir la geometría final de la pieza de trabajo. La figura 26.22 ilustra los patrones del ciclo para producir diferentes formas en una rectificadora de funciones múltiples controlada por computadora. Las flechas hacia abajo con números en las figuras indican el principio del ciclo.

La determinación del patrón óptimo y más económico para el tiempo mínimo del ciclo depende del volumen del material a remover, de la forma de la parte y de los parámetros del proceso. Todos los patrones ilustrados se generan automáticamente mediante el software de los controles de la computadora de la rectificadora.

Fuente: Con base en Toyoda Machinery/JTEKT.

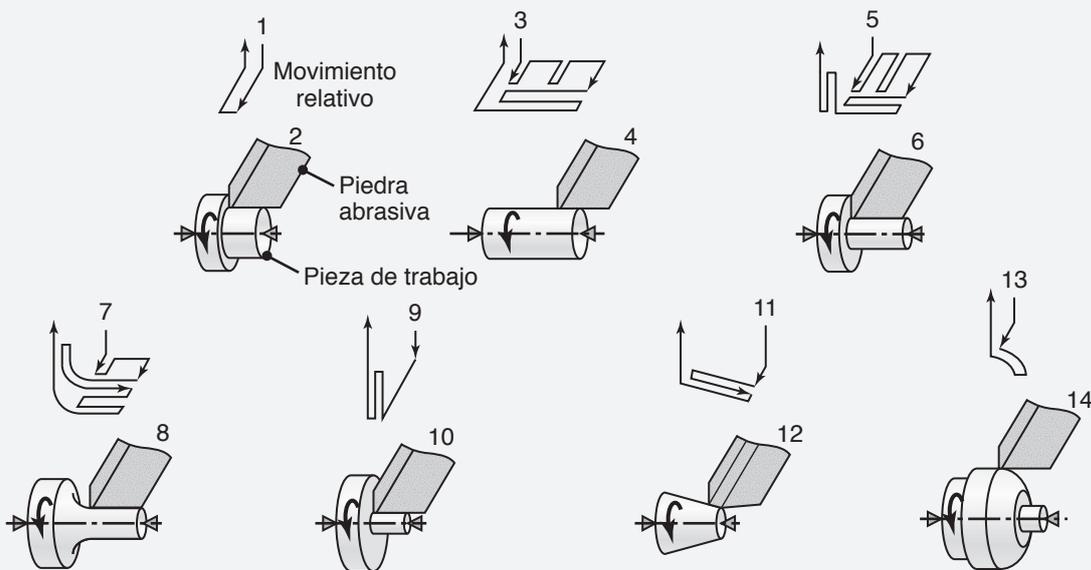


FIGURA 26.22 Patrones del ciclo para una rectificadora de precisión CNC.

Rectificado interno. En el *rectificado interno* (figura 26.23), se utiliza una piedra pequeña para rectificar el diámetro interior de la parte, como en los cojinetes y rodamientos. La pieza de trabajo se sujeta en un plato rotatorio y la piedra gira a 30 000 rpm o más. Los perfiles internos también se pueden trabajar con piedras *adaptadas al perfil*, que se mueven radialmente dentro de la pieza de trabajo. El cabezal de las rectificadoras internas también puede girar en el plano horizontal para rectificar barrenos con ahusamientos.

Rectificado sin centro. El *rectificado sin centro* es un proceso de alta producción para rectificar superficies cilíndricas; la pieza de trabajo está apoyada no por centros (de ahí el término “sin centro”) o platos, sino por una *cuchilla*, como se ilustra en las figu-

ras 26.24a y b. Las partes que es común manufacturar con este proceso son rodamientos, pernos de pistones, válvulas de motores, árboles de levas y otros componentes similares. Se pueden obtener partes tan pequeñas como de 0.1 mm (0.004 pulg). Las rectificadoras sin centro (figura 26.24d) son capaces de desarrollar velocidades del orden de 10 000 m/min (35 000 pies/min), por lo general empleando piedras abrasivas hechas de nitruro de boro cúbico.

En el *rectificado de avance continuo* la pieza de trabajo está apoyada en una hoja en reposo y se trabaja de manera continua (de ahí el término “avance continuo”) entre dos piedras (figura 26.24a). El rectificado lo realiza la piedra más grande, mientras la pequeña regula el movimiento axial de la pieza de trabajo. La *piedra reguladora* aglutinada con hule está inclinada y opera a una velocidad mucho menor, a un vigésimo de la velocidad de la piedra abrasiva.

Las partes con diámetros variables, como remaches, llaves de válvulas y ejes de diámetros múltiples, se pueden trabajar mediante un proceso conocido como *rectificado de avance interior* o de *penetración (plunge)* (figura 26.24b), operación parecida al rectificado de penetración o de conformación en rectificadoras cilíndricas. Las piezas con ahusamientos son manufacturadas sin centro por medio del *rectificado de avance final*. El *rectificado de rosca* se lleva a cabo con altas tasas de producción con rectificadoras sin centro, empleando piedras especialmente adaptadas. En el *rectificado interno sin centro*, la pieza de trabajo se apoya entre tres cilindros y se trabaja internamente; las aplicaciones comunes son partes de conexión y anillos (figura 26.24c).

Rectificado de avance lento. Aunque el rectificado se ha asociado tradicionalmente con tasas pequeñas de remoción de material (tabla 26.3) y de acabado fino, también puede usarse para operaciones de remoción de material a gran escala. En el *rectificado de avance lento*, la profundidad de corte de la piedra, d , es de hasta 6 mm (0.25 pulg) y la velocidad de la pieza de trabajo es baja (figura 26.25). Las piedras están aglutinadas con resina de grado suave y tienen estructura abierta para mantener bajas las temperaturas de la pieza de trabajo y mejorar el acabado de la superficie.

Las máquinas para el rectificado de avance lento tienen características especiales, como una potencia de hasta 225 kW (300 hp), gran rigidez (debido a las intensas fuerzas producidas por la gran profundidad del material removido), alta capacidad de sujeción, velocidades variables del eje y la mesa de trabajo y abundante capacidad para los fluidos de rectificar. Pueden afilar continuamente la piedra abrasiva al usar un cilindro incrustado de diamante como herramienta afiladora.

El rectificado de avance lento es competitivo con otros procesos de maquinado como fresado, brochado y cepillado, es económico para aplicaciones específicas como barrenos con forma, cuñas, canales de brocas, bases de álabes de turbina (figura 26.25c) y otras partes complejas hechas con superaleaciones. Debido a que la piedra está adaptada a la forma de la pieza de trabajo que se va a producir, ésta no tiene que estar conformada previamente por fresado, formado o brochado; por lo anterior, los fundidos y forjas de forma casi neta son apropiados para el rectificado de avance lento. Aunque por lo general es suficiente una sola pasada de rectificado, puede ser necesaria una segunda para mejorar el acabado de la superficie.

Desbaste pesado por medio de rectificado. El rectificado también puede usarse para desbaste pesado al incrementar los parámetros del proceso como la profundidad de corte de la piedra. Esta operación es económica en aplicaciones específicas y compite favorablemente con los procesos de maquinado, en particular con el fresado, torneado y brochado. En esta operación el acabado de la superficie es de importancia secundaria, las tolerancias dimensionales son del mismo orden que las obtenidas con la mayor parte de procesos de maquinado y la piedra (o banda) abrasiva se puede utilizar a toda su capacidad, al mismo tiempo que se minimiza el costo por pieza rectificada. El desbaste pesado por medio de rectificado también se realiza en soldaduras, fundidos y forjas para suavizar los cordones de soldadura y eliminar las salpicaduras.

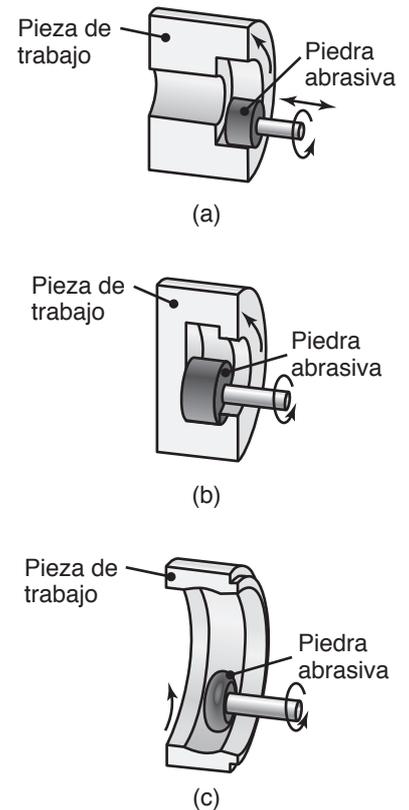


FIGURA 26.23 Ilustraciones esquemáticas de operaciones de rectificado interno; (a) rectificado longitudinal; (b) rectificado de penetración y (c) rectificado de perfil.

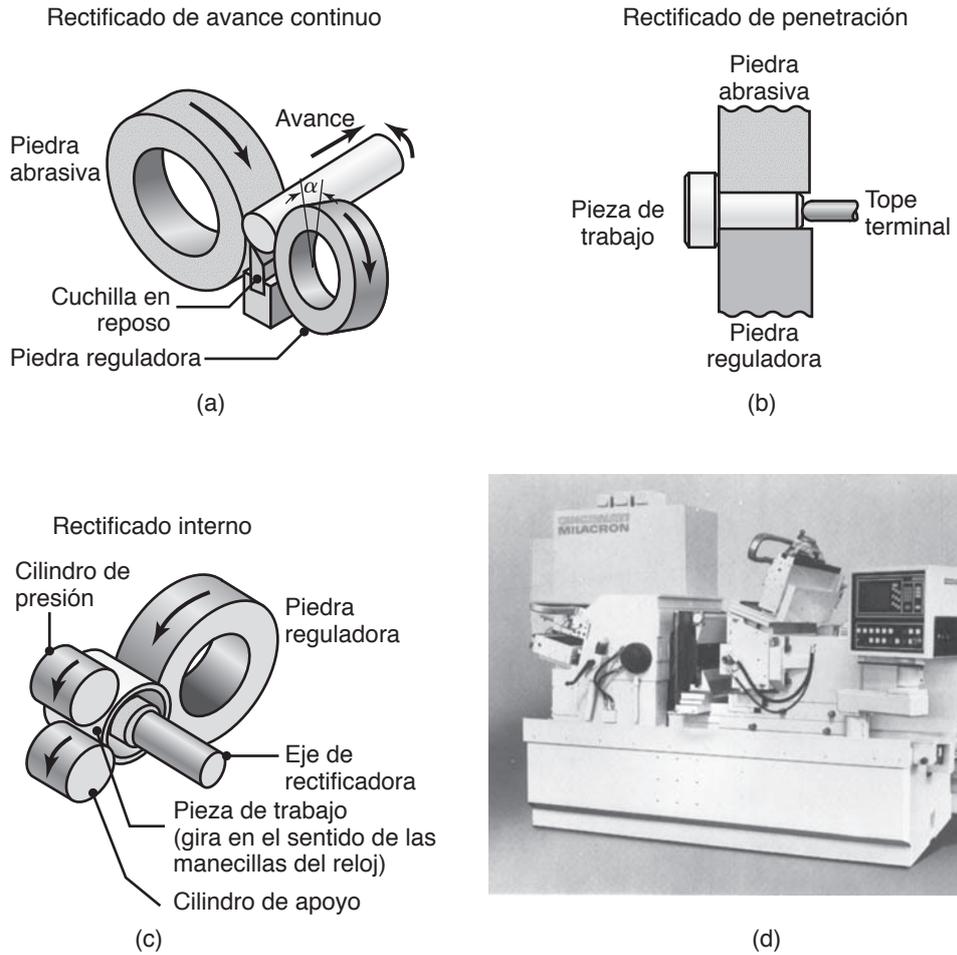


FIGURA 26.24 Ilustraciones esquemáticas de operaciones de rectificado sin centro; (a) rectificado de avance continuo; (b) rectificado de penetración; (c) rectificado interno y (d) rectificadora cilíndrica de control numérico computarizado. Fuente: Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

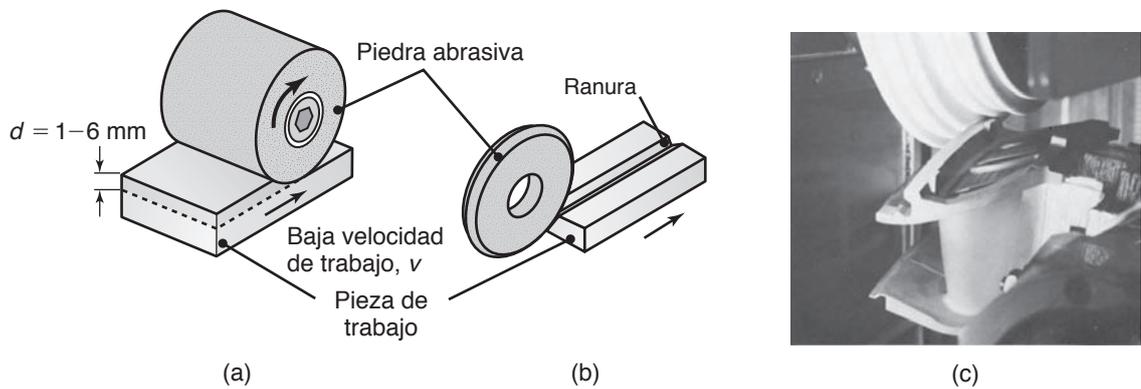


FIGURA 26.25 (a) Ilustración esquemática del proceso de rectificado de avance lento; observe la gran profundidad de corte, d , de la piedra. (b) Ranura con forma producida en una superficie plana por medio del rectificado de avance lento en un paso; la profundidad de la ranura es típicamente de algunos milímetros. (c) Ejemplo de rectificado de avance lento con una piedra conformada; esta operación también se puede realizar por medio de los procesos descritos en el capítulo 27. Fuente: Cortesía de Blohm, Inc.

EJEMPLO 26.4 Rectificado *versus* torneado de alta dureza

En vista de los análisis efectuados hasta este momento, es evidente que en ciertas aplicaciones específicas el rectificado y el torneado de alta dureza (descrito en la sección 25.6) pueden ser comparables en aplicaciones específicas. El torneado de alta dureza es cada vez más competitivo con el rectificado, y las tolerancias dimensionales y el acabado de la superficie se aproximan a los que se obtienen con el rectificado. Considere el caso del *maquinado* de aceros tratados con calor, con dureza por arriba de 45 HRC, utilizando una herramienta de nitruro de boro cúbico policristalino de un solo punto, *versus* el *rectificado* de estos aceros.

Al comparar las tablas 21.2 y 26.2, se observa que (a) el torneado requiere mucha menos energía que el rectificado; (b) con el maquinado es menos probable que haya daño térmico y de otro tipo en la superficie de la pieza de trabajo; (c) los fluidos de corte podrían

no ser necesarios y (d) los tornos son menos caros que las rectificadoras. Además, las operaciones de acabado, inclusive el rectificado de acabado, pueden llevarse a cabo en la parte torneada mientras aún se encuentra en el plato del torno.

Por otro lado, durante el torneado de alta dureza los dispositivos de sujeción del trabajo para piezas grandes y especialmente esbeltas pueden tener problemas importantes debido a que las fuerzas de corte son mayores que las del rectificado. Más aún, el desgaste de la herramienta y su control pueden convertirse en un problema significativo en comparación con elafilamiento automático de las piedras abrasivas. Es evidente que la posición competitiva del torneado de alta dureza *versus* el rectificado debe evaluarse en forma individual para cada aplicación, en términos del acabado e integridad de la superficie, la calidad y rentabilidad general.

Para las distintas operaciones se usan varios tipos de rectificadoras:

- **Rectificadoras universales para herramientas y cortadores** Se usan para rectificar herramientas y cortadores de un solo punto o de puntos múltiples, inclusive brocas. Están equipadas con dispositivos especiales de sujeción del trabajo para posicionar con exactitud las herramientas que se han de trabajar. Hay una variedad de rectificadoras de control numérico computarizado para herramientas, lo que hace la operación más sencilla y rápida con resultados consistentes. El costo de estas rectificadoras está en el rango de \$150 000 a \$400 000.
- Las **rectificadoras de torno** son unidades autocontenidas que por lo general se encuentran sujetas al poste de herramientas de un torno (vea la figura 23.2). La herramienta se monta en el cabezal y se trabaja moviendo el poste de herramientas. Estas rectificadoras son versátiles pero es esencial que los componentes del torno se protejan del polvo abrasivo.
- Las **rectificadoras de bastidor pendular** se usan en las plantas fundidoras para rectificar grandes piezas fundidas. El rectificado de desbaste de éstas se llama **de desgarrar** y por lo general se realiza en *esmeriles de taller* que usan piedras de hasta 0.9 m (36 pulg) de diámetro.
- Las **rectificadoras portátiles** se emplean para operaciones como el rectificado de gotas de soldadura y para *cortar* por medio de discos delgados abrasivos. Se mueven neumáticamente o con electricidad, o bien mediante un eje flexible conectado a un motor eléctrico o de gasolina.
- Las **rectificadoras de banco y pedestal** se usan para el rectificado rutinario y rápido de herramientas y partes pequeñas. Por lo general están equipadas con dos piedras abrasivas montadas en los dos extremos del eje de un motor eléctrico; es común que una rueda sea gruesa para el rectificado de desbaste y la otra fina para el rectificado de acabado.

Fluidos para rectificar. Las funciones de los fluidos para rectificar son semejantes a las de los fluidos de corte descritos en la sección 22.12. Aunque el rectificado y otros procesos de remoción abrasiva se pueden ejecutar en seco, el uso de un fluido es importante debido a que:

- Reduce el aumento de temperatura en la pieza de trabajo.
- Mejora el acabado de la superficie de la parte y su exactitud dimensional.
- Mejora la eficiencia de la operación al reducir el desgaste de la piedra, lo que reduce la carga de ésta y disminuye el consumo de energía.

TABLA 26.5**Recomendaciones generales para el uso de fluidos en el rectificado**

Material	Fluido para rectificar
Aluminio	E, EP
Cobre	CSN, E, MO + FO
Magnesio	D, MO
Níquel	CSN, EP
Metales refractarios	EP
Aceros	CSN, E
Titanio	CSN, E

Nota: D = Seco; E = Emulsión; EP = Presión extrema; CSN = Químicos y sintéticos; MO = Aceite mineral; FO = Aceite grasoso, todos por sus siglas en inglés (vea también la sección 33.7).

Los fluidos para rectificar por lo general son *emulsiones con base de agua*, para el rectificado general, y *aceites* para el rectificado de roscas (tabla 26.5). Se aplican como corriente (flujo) o como rocío (mezcla de fluido y aire). Debido a las altas velocidades superficiales involucradas, una corriente de aire (*cortina de aire*) alrededor de la periferia de la piedra abrasiva impide que el fluido llegue a la interfase entre la piedra y la pieza de trabajo. Se han diseñado boquillas especiales, las cuales se adaptan a la forma de la superficie de corte de la piedra abrasiva dondequiera que el fluido se suministre a alta presión.

Puede haber un aumento significativo en la temperatura de los fluidos para rectificar a base de agua, ya que absorben calor de la zona de trabajo. Esto hace que la pieza de trabajo se expanda, lo que dificulta el control de la exactitud dimensional. Un método común para mantener una temperatura más uniforme de la pieza de trabajo es usar sistemas refrigerantes (*enfriadores*), con los cuales el fluido para rectificar se hace circular en forma continua y se mantiene a una temperatura aproximadamente constante. Como se describió en la sección 22.12, importantes consideraciones *biológicas* y *ecológicas* en la selección y uso de fluidos para el trabajo de metales son los aspectos de su eliminación, tratamiento y reciclado. Las prácticas que se empleen deben cumplir las leyes y reglamentos federales, estatales y locales.

Traqueteo en el rectificado. El *traqueteo* tiene importancia particular en el rectificado ya que perjudica el acabado de la superficie y el rendimiento de la piedra abrasiva. El estudio de las **marcas de traqueteo** en las superficies trabajadas ayuda a identificar su fuente, que puede ser en (a) rodamientos y ejes de la rectificadora; (b) irregularidades de fábrica en la piedra abrasiva; (c) desgaste disperejo de la piedra; (d) técnicas inadecuadas de afilado; (e) piedras abrasivas que no están balanceadas adecuadamente y (f) fuentes externas, como maquinaria cercana. La operación de rectificar en sí puede ocasionar un *traqueteo regenerativo*, como ocurre en el maquinado y se describe en la sección 25.4.

Los factores importantes para controlar el traqueteo son la rigidez de la máquina, la rigidez de los dispositivos para sujetar el trabajo y la fijación del sistema. Se han establecido lineamientos generales para reducir la tendencia al traqueteo durante el rectificado, que incluyen especialmente (a) el uso de piedras abrasivas de grado suave; (b) afilar con frecuencia la piedra; (c) cambiar las técnicas de afilado; (d) reducir la tasa de remoción de material y (e) apoyar rígidamente la pieza de trabajo.

Seguridad en las operaciones de rectificado. Dado que las piedras abrasivas son frágiles y giran a grandes velocidades, se pueden fracturar con facilidad. Deben observarse ciertos procedimientos para su manejo, almacenamiento y uso; las fallas al seguir dichos procedimientos e instrucciones y advertencias impresas en las etiquetas de las piedras pueden ocasionar heridas graves, incluso la muerte. Las piedras abrasivas se deben almacenar adecuadamente y proteger de los extremos ambientales como altas temperaturas o humedad. Deben inspeccionarse visualmente en busca de grietas y otros daños antes de instalarlas en las rectificadoras. Antes de usar piedras vitrificadas, deben probarse *haciéndolas sonar*, es decir, tomarlas por el orificio y golpearlas suavemente para escuchar el sonido; una piedra dañada tendrá un sonido grave parecido al de un plato de cocina agrietado.

El daño de una piedra abrasiva reduce mucho su **velocidad de explosión** o **desintegración**. Definida como la velocidad superficial a la cual una piedra que gira libremente se desintegra (*estalla*), la velocidad de explosión (expresada en rpm) depende del tipo de piedra, es decir de su aglutinante, grado y estructura. En las piedras de diamante y BNC (figura 26.6), que operan a grandes velocidades superficiales, el tipo del material principal usado en la rueda afecta la velocidad de explosión. Por ejemplo, las piedras metálicas tienen la velocidad de explosión más grande, que por lo general es del orden de 250 m/s (800 pies/s).

26.5 Consideraciones de diseño en el rectificado

Las consideraciones de diseño para las operaciones de rectificado son básicamente similares a las del maquinado, como se describieron en las diferentes secciones de los capítulos 23 y 24. Además, debe prestarse atención específica a las siguientes:

- Las partes a trabajar deben diseñarse de manera que se puedan montar con seguridad, ya sea en platos, mesas magnéticas o en equipos y accesorios de sujeción apropiados. Las piezas de trabajo delgadas, rectas o tubulares pueden distorsionarse durante el rectificado, por lo que requieren atención especial.
- Si se necesita una exactitud dimensional grande, deben evitarse las superficies interrumpidas, como agujeros y aberturas, ya que causan vibraciones y traqueteo.
- Deben balancearse las partes para el rectificado cilíndrico y evitarse los diseños largos y esbeltos con el fin de minimizar las deflexiones. Los radios de los cortes y esquinas deben ser lo más grandes posible o darles un relieve mediante un maquinado previo a estas regiones.
- En el rectificado sin centro, las piezas cortas pueden ser difíciles de trabajar con precisión debido a que tal vez la cuchilla no les dé apoyo. En el rectificado de avance continuo sólo puede trabajarse el diámetro más grande de las partes.
- El diseño de partes que requiera exactitud en el rectificado debe mantenerse lo más simple posible para evitar el afilado frecuente de la forma de la piedra abrasiva.
- Hay que evitar los agujeros profundos y pequeños, así como las perforaciones ciegas que requieran rectificado interno, o bien incluir un relieve en ellos.

En general, los diseños de las partes requieren que en el rectificado se remueva una mínima cantidad de material, excepto para el rectificado de avance lento. Además, con el fin de mantener una exactitud dimensional apropiada, es preferible que los diseños permitan que todo el rectificado se haga sin tener que reposicionar la pieza de trabajo.

26.6 Maquinado ultrasónico

En el *maquinado ultrasónico* (UM, por sus siglas en inglés), el material se remueve a partir de una superficie por *microvirutas* y *erosión* con granos abrasivos sueltos y finos en una solución acuosa (figura 26.26a). El extremo de la herramienta (llamada *sonotrodo*) vibra a una frecuencia de 20 kHz y amplitud de 0.0125 a 0.075 mm (0.0005 a 0.003 pulg). La vibración imparte una gran velocidad a los granos abrasivos entre la herramienta y la pieza de trabajo. Los esfuerzos producidos por las partículas abrasivas que impactan la superficie de la pieza son elevados porque (a) el tiempo de contacto entre la partícula

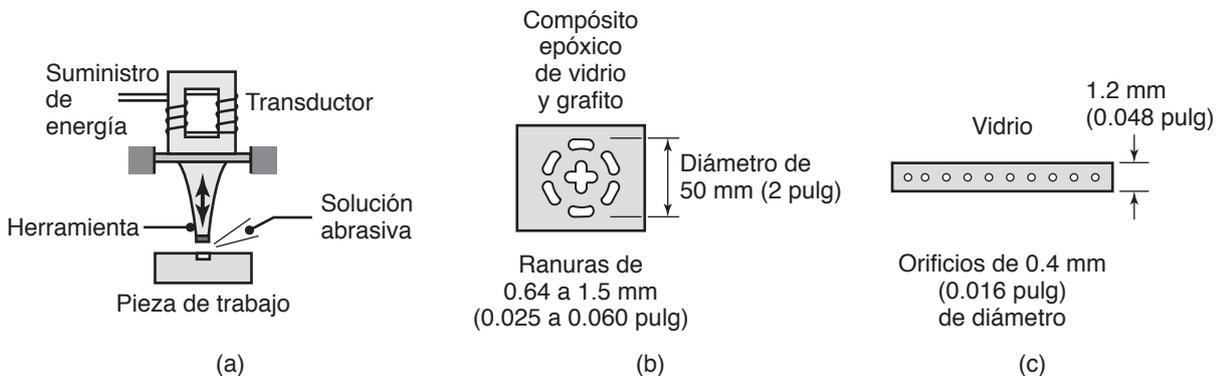


FIGURA 26.26 (a) Ilustración esquemática del proceso de maquinado ultrasónico. (b) y (c) Tipos de partes manufacturadas por este proceso; observe la pequeñez de los orificios producidos.

y la superficie es muy breve, del orden de 10 a 100 μs y (b) el área de contacto es muy pequeña. En los materiales frágiles dichos esfuerzos de impacto son lo suficientemente grandes como para remover material de la superficie de la pieza de trabajo.

Es común que los granos abrasivos sean de carburo de boro, aunque también se usan óxido de aluminio o carburo de silicio, con tamaños que van del número de malla 100 para el rectificado de desbaste al número 1000 para las operaciones de acabado. Los granos son transportados en una solución acuosa con concentraciones volumétricas del 20 al 60%; la mezcla también retira los residuos de la zona de corte. El maquinado ultrasónico es más apropiado para materiales duros y frágiles como cerámicos, carburos, piedras preciosas y aceros endurecidos; en las figuras 26.26b y c se presentan dos ejemplos. Se requiere una herramienta especial para cada forma que haya de producirse, por lo que también recibe el nombre de *herramienta conformada*. El extremo de la herramienta, que está unido a un transductor a través del portaherramientas, suele estar hecho de acero suave.

Maquinado ultrasónico rotatorio. En este proceso, a la solución abrasiva la reemplaza una herramienta con abrasivos de diamante con aglutinante metálico que están o impregnados o en forma de chapa sobre la superficie de la herramienta. Ésta vibra en modo ultrasónico y al mismo tiempo gira, mientras es presionada contra la superficie de la pieza de trabajo a presión constante. El proceso es parecido a una operación de fresado refrentado (vea la figura 24.5), pero con los insertos sustituidos por abrasivos. Un refrigerante retira las virutas producidas, las cuales se bombean a través del núcleo de la herramienta rotatoria. El maquinado ultrasónico rotatorio (RUM, por sus siglas en inglés) es particularmente eficaz para producir orificios profundos y con grandes tasas de remoción de material en partes de materiales cerámicos.

Consideraciones de diseño para el maquinado ultrasónico. Entre los lineamientos básicos para el UM están los siguientes:

- Evitar perfiles, esquinas y radios agudos ya que pueden ser erosionados por la solución abrasiva.
- Recuerde que los agujeros producidos tendrán algún ahusamiento.
- Observe que por la tendencia de los materiales frágiles a producir virutas en el extremo de salida de los orificios, el fondo de las partes debe tener una placa de respaldo.

26.7 Operaciones de acabado

Otros diversos procesos utilizan granos abrasivos finos y se usan como una operación de acabado final. Debido a que dichas operaciones afectan de manera significativa el tiempo y costo de producción, deben especificarse sólo después de la consideración debida de sus características adicionales de costo *versus* beneficios.

Abrasivos recubiertos. Ejemplos comunes de *abrasivos recubiertos* son el papel y la tela de lija; la mayoría están elaborados con óxido de aluminio, con carburo de silicio y alúmina de circonio como aditivos. Los abrasivos recubiertos suelen tener una estructura mucho más abierta que la de las piedras abrasivas y sus granos son más puntiagudos y agresivos. Los granos se depositan electrostáticamente en materiales flexibles de sostén, como papel, algodón, poliéster o rayón, polinailon y varias combinaciones más.

Como se aprecia en la figura 26.27, el material aglutinante (matriz) por lo general es resina (llamada *base aglutinante*) que se aplica primero al respaldo; después se adhieren los granos con una segunda capa (*de recubrimiento*). Los granos tienen sus ejes principales alineados en forma

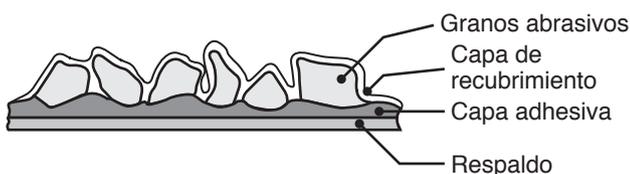


FIGURA 26.27 Ilustración esquemática de la estructura de un abrasivo recubierto; ejemplos comunes de estos abrasivos son el papel de lija (desarrollado en el siglo xvi) y la tela esmeril.

perpendicular al plano del respaldo, lo que mejora su acción cortadora. Hay abrasivos recubiertos en forma de hojas, bandas y discos. Se usan mucho para dar el acabado a superficies planas o curvadas de partes metálicas y no metálicas, especímenes de metalografía y en trabajos de madera.

Rectificado con banda. Los abrasivos recubiertos también se emplean en forma de *bandas* para tener una tasa elevada de remoción de material con buen acabado de la superficie. El *rectificado con banda* es un importante proceso de producción, en ciertos casos compite con las operaciones de rectificado convencional y es preferible a éstas. Hay bandas con números de malla que van del 16 al 1500 (vea las figuras 22.6 y 22.7). Sus velocidades están en el rango de 700 a 1800 m/min (2500 a 6000 pies/min). Las máquinas para las operaciones con banda abrasiva requieren un apoyo apropiado, el cual debe tener una construcción rígida para minimizar las vibraciones.

Los abrasivos recubiertos convencionales tienen abrasivos colocados aleatoriamente en su superficie y constan de una o varias capas de abrasivos. Una superficie alternativa se produce por medio de *microrréplicas*, en las que abrasivos en forma de diminutas pirámides de óxido de aluminio se colocan ordenadamente en un arreglo predeterminado sobre la superficie de la banda. Cuando se usan en aceros inoxidable y superaleaciones, tienen un desempeño más consistente que los abrasivos recubiertos convencionales y las temperaturas que se generan son menores. Las aplicaciones comunes para el acabado con abrasivos recubiertos incluyen el rectificado con banda de palos de golf, armas de fuego, aspas de turbina, implantes quirúrgicos e instrumentos médicos y dentales.

EJEMPLO 26.5 Rectificado con banda de paleta reguladora de turbina

La paleta reguladora de una turbina que se ilustra en la figura 26.28 fue una fundición revestida (sección 11.8) con una superaleación de base cobalto. Para remover una delgada capa de difusión de los extremos inicial y terminal del aspa, se trabajó en una banda abrasiva con respaldo de tela (óxido de aluminio de malla 60). Las aspas se montaron en un arreglo de sujeción y se trabajaron en seco con una velocidad de la banda de

1800 m/min (6000 pies/min). La tasa de producción fue de 93 s por pieza. Cada aspa pesaba 21.65 g antes de ser procesada y 20.25 g después, lo que significa una reducción de 6.5% de su peso.

Fuente: Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.

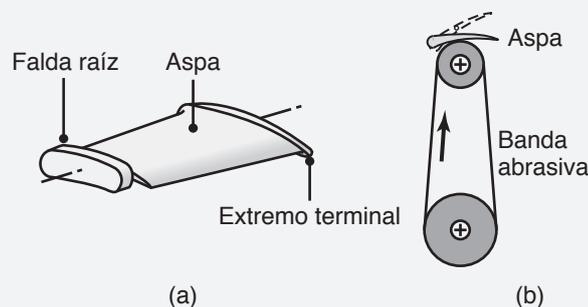


FIGURA 26.28 Paleta reguladora de turbina considerada en el ejemplo 26.5.

Cepillado con alambre. En este proceso, también llamado *cepillado de potencia*, se sujeta la pieza de trabajo contra un cepillo circular de alambre que gira a velocidades que van de 1750 rpm, para piedras abrasivas grandes, a 3500 para piedras chicas. A medida que tallan, las puntas del alambre producen limaduras longitudinales en la superficie de la pieza de trabajo. El cepillado con alambre se usa para obtener una textura fina o controlada de la superficie. Cuando se ejecuta en condiciones apropiadas, el cepillado con alambre también se considera como un proceso ligero de remoción de material. Además

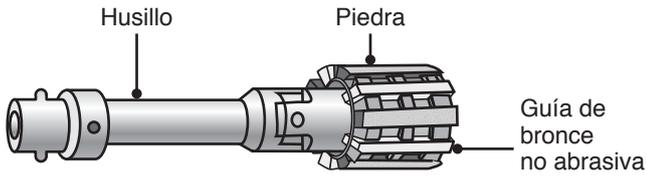


FIGURA 26.29 Ilustración esquemática de una herramienta asentadora que se usa para mejorar el acabado de la superficie de barrenos taladrados o perforados.

de los alambres metálicos, pueden usarse de manera eficaz otros de polímero (como nailon, sección 7.6) incrustados con abrasivos (vea también *sierras de alambre con diamante*, sección 24.5).

Asentado. El *asentado* es una operación que se usa sobre todo para mejorar el acabado de la superficie de barrenos producidos por procesos tales como mandrinado, taladrado y fresado interno. La herramienta con que se asienta consiste en un conjunto de varillas de abrasivos aglutinados de óxido de aluminio o carburo de silicio,

por lo general llamados *pedras* (figura 26.29). Están montadas en un mandril que gira en el barreno a velocidades superficiales de 45 a 90 m/min (150 a 300 pies/min) y aplican una fuerza radial hacia el exterior sobre la superficie del barreno. Las pedras se ajustan radialmente para diferentes tamaños de barrenos.

La herramienta tiene un movimiento axial recíproco que produce un patrón en forma de cruz en la superficie del barreno. Por lo general se usan fluidos para asentar con base en aceite o agua para ayudar a drenar los residuos y mantener las temperaturas bajas. El asentado también se realiza en superficies externas cilíndricas o planas y para remover manualmente los bordes agudos en las herramientas de corte o en insertos (vea la figura 22.5).

La calidad de la superficie producida por asentado puede controlarse con el tipo y tamaño del abrasivo utilizado, la presión que se aplique y la velocidad. Si no se ejecuta en forma apropiada, el asentado puede producir barrenos que no sean ni rectos ni cilíndricos, sino en forma de campana abierta, ondulante, en forma de barril o con ahusamientos.

Superacabado. En este proceso la presión aplicada es muy ligera y el movimiento de la piedra de asentar tiene un paso corto. El movimiento de la piedra se controla de modo que los granos no recorran la misma trayectoria sobre la superficie de la pieza de trabajo. En la figura 26.30 se presentan ejemplos del superacabado externo de una parte cilíndrica.

Lapeado. Ésta es una operación para dar acabado a superficies planas, cilíndricas o curvadas. Por lo general, la herramienta de *lapear* (figura 26.31) es relativamente suave y porosa, elaborada con materiales como hierro fundido, cobre, piel o tela. Las partículas abrasivas están incrustadas en la herramienta de lapear o se transportan en una solución acuosa. El frotamiento de objetos esféricos y lentes de vidrio se realiza con lapeadores de forma especial. Mantener la *buenas condiciones de funcionamiento* de un par de engranes se puede hacer por medio del lapeado, así como las de engranes hipocicloides para ejes traseros. En función del tipo y dureza del material de la pieza de trabajo, las presiones en el lapeado van de 7 a 140 kPa (1 a 20 psi).

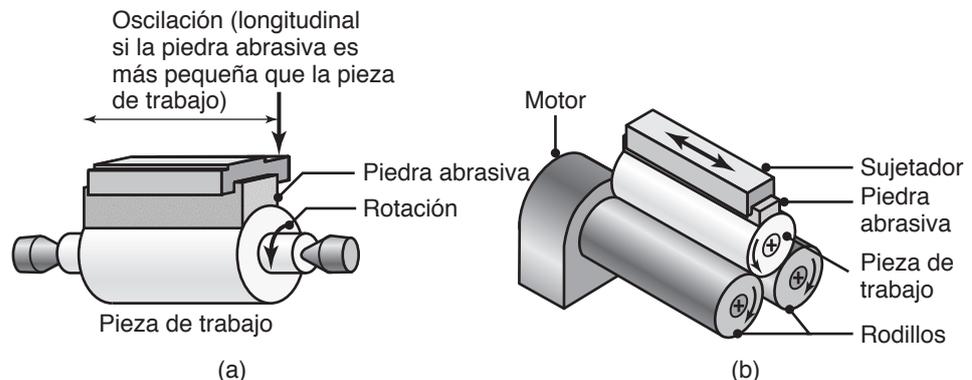


FIGURA 26.30 Ilustraciones esquemáticas del proceso de superacabado para una parte cilíndrica. (a) Microasentado cilíndrico. (b) Microasentado sin centro.

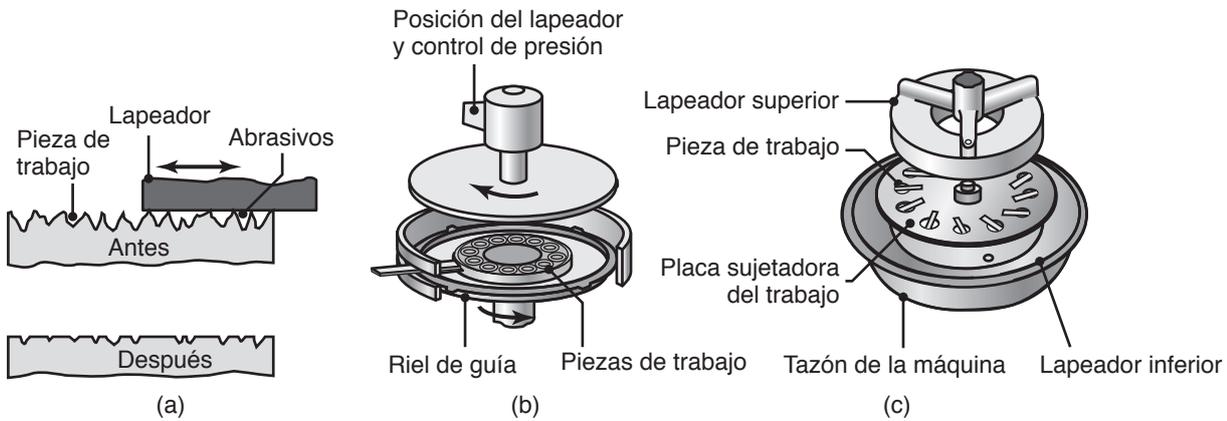


FIGURA 26.31 (a) Ilustración esquemática del proceso de lapeado. (b) Lapeado de producción en superficies planas. (c) Lapeado de producción en superficies cilíndricas.

Con el lapeado pueden obtenerse tolerancias dimensionales del orden de ± 0.0004 mm (0.000015 pulg), usando abrasivos finos (tamaño de malla de hasta 900), y el acabado de la superficie llega a ser tan suave como de 0.025 a $0.1 \mu\text{m}$ (de 1 a 4 μpulg). El lapeado de producción de piezas planas o cilíndricas se lleva a cabo en máquinas parecidas a las que se ilustran en las figuras 26.31b y c.

Pulido. El *pulido* es un proceso que produce acabados suaves y lustrosos para las superficies. El mecanismo básico en el proceso de pulido es el suavizado y afinado de las capas superficiales, por medio del calor desarrollado durante el pulido, así como por la remoción de abrasivos de escala muy fina de la superficie de la pieza de trabajo. El aspecto brillante que es común observar en las superficies pulidas resulta de la acción de afinado.

El pulido se realiza con discos o bandas, de tela, piel o fieltro, que por lo general están recubiertos con polvos finos de óxido de aluminio o diamante. En el *pulido de doble lado* se colocan pares de cojines a las caras de placas que giran horizontalmente y en direcciones opuestas. Puede ser difícil pulir partes con formas irregulares, esquinas agudas, huecos profundos y proyecciones afiladas.

Pulido químico-mecánico. El *pulido químico-mecánico* (CMP, por sus siglas en inglés) es extremadamente importante en la industria de los semiconductores. Este proceso, que se ilustra en la figura 26.32, utiliza una suspensión de partículas abrasivas en una solución con base de agua y una química específica para causar una corrosión controlada.

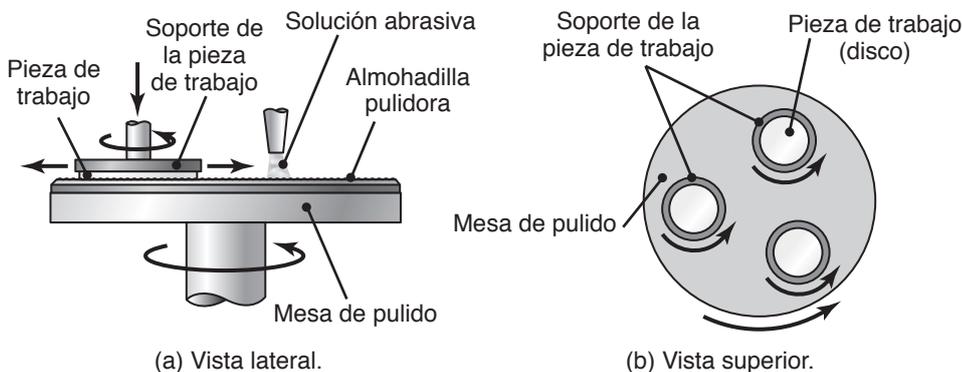


FIGURA 26.32 Ilustración esquemática del proceso de pulido químico-mecánico. Este proceso se utiliza mucho en la manufactura de obleas de silicio y circuitos integrados, también se conoce como *aplanamiento químico-mecánico*; para otros materiales y aplicaciones se usan otros soportes y más discos por soporte.

La remoción de material de la superficie de la pieza de trabajo es por medio de acciones combinadas de abrasión y corrosión. La superficie producida tiene un acabado muy fino y especialmente plano; por esta razón es frecuente que se haga referencia a este proceso como **aplanamiento químico-mecánico**.

Una aplicación importante de este proceso es el pulido de obleas de silicio, en cuyo caso la función principal del CMP es pulir a nivel micrométrico. Entonces, para remover material en forma uniforme y por toda la oblea, ésta se sujeta con la cara hacia abajo sobre un soporte giratorio y se presiona contra una almohadilla pulidora sujeta a un disco giratorio, como se aprecia en la figura 26.32. Las velocidades angulares del soporte y la almohadilla se seleccionan de modo que haya una velocidad relativa constante entre el soporte y la almohadilla sobre el eje que conecta sus centros. La almohadilla contiene ranuras cuyo objetivo es suministrar de manera uniforme la solución acuosa a todas las obleas. Asimismo, la rotación de la almohadilla asegura que no se desarrolle una capa lineal (vea la sección 33.3).

Se han desarrollado combinaciones de abrasivos específicos y de química de la solución para pulir cobre, silicio, dióxido de silicio, aluminio, tungsteno y otros metales. Por ejemplo, para pulir dióxido de silicio o silicio, se suministra de manera continua a la interfase almohadilla-oblea una solución alcalina de silicio coloidal (partículas de SiO_2 en una solución de KOH o de NH_4OH).

Electropulido. Es posible obtener acabados de espejo para las superficies metálicas por *electropulido*, proceso que es lo inverso de la electrodeposición (descrita en la sección 34.9). Dado a que no hay contacto mecánico con la pieza de trabajo, este proceso es apropiado en particular para pulir formas irregulares. El electrolito ataca las proyecciones y picos de la superficie de la pieza de trabajo a una tasa mayor que al resto de la superficie, lo que produce una superficie suave. El electropulido se emplea también para operaciones de eliminación de rebabas (sección 26.8).

Pulido de campos magnéticos. En esta técnica las soluciones abrasivas se apoyan con campos magnéticos. Hay dos métodos básicos:

1. En el **pulido de flotación magnética** de esferas de cerámico, que se ilustra en la figura 26.33a, un fluido magnético (que contiene granos abrasivos y partículas ferromagnéticas extremadamente finas en un fluido portador, como agua o queroseno) llena la cámara dentro de un anillo guía. Las esferas de cerámico se localizan entre un eje impulsor y un flotador. Los granos abrasivos, las esferas de cerámico y el flotador (hecho de un material no magnético) están suspendidos por fuerzas mag-

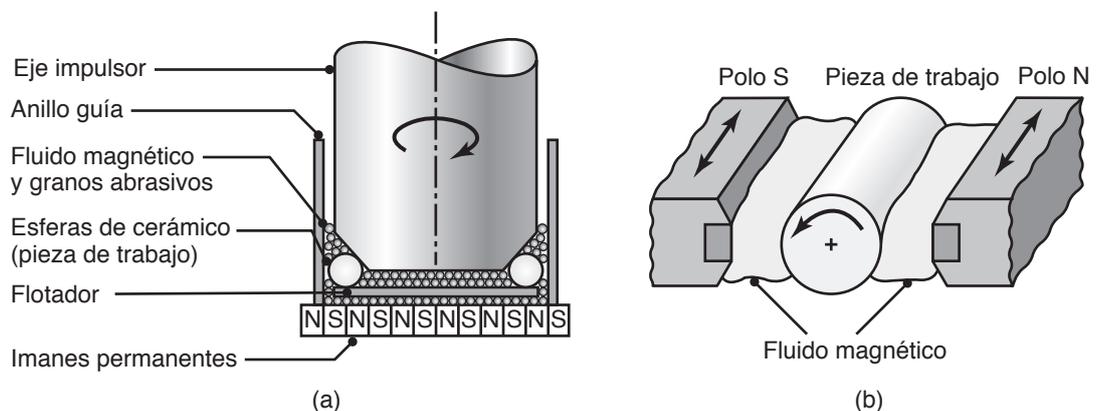


FIGURA 26.33 Ilustración esquemática del pulido de esferas y rodillos por medio de campos magnéticos. (a) Pulido con flotación magnética de esferas de cerámico. (b) Pulido de rodillos asistido con campos magnéticos. Fuente: Tomado de R. Komanduri, M. Doc y M. Fox.

néticas. Las esferas son presionadas contra el eje direccional giratorio y se pulen por la acción abrasiva. Las fuerzas aplicadas por las partículas abrasivas sobre las esferas son pequeñas en extremo y controlables, de modo que la acción de pulido es muy fina. Debido a que los tiempos de pulido son mucho menores que los de otros métodos abrasivos, este proceso es muy rentable y las superficies obtenidas tienen pocos defectos o ninguno.

2. En la figura 26.33b se ilustra el **pulido asistido con campo magnético** de rodillos de cerámico. Se sujeta un rodillo de cerámico o acero (como la pieza de trabajo) y se hace girar sobre un eje. Los polos magnéticos se hacen oscilar, lo que introduce un movimiento vibratorio al conglomerado magnético-abrasivo, acción que pule la superficie del rodillo cilíndrico. Con este proceso se obtiene en 30 segundos un acabado tipo espejo para rodamientos de acero de dureza HRC 63.

Abrillantado. El *abrillantado* es semejante al pulido, excepto que se obtiene un acabado de la superficie aún más terso con el empleo de abrasivos muy finos sobre discos suaves que por lo general están elaborados con tela o carnaza. El abrasivo se suministra externamente desde una varilla de compuesto abrasivo.

26.8 Operaciones de desbarbado

Las **barbas** o **rebabas** son rugosidades delgadas, por lo general de forma triangular, que se desarrollan a lo largo de los bordes de una pieza de trabajo debido a operaciones como el maquinado, laminado de placas metálicas (como en las figuras 16.2 y 16.3) y el recorte de forjas y fundidos. Las rebabas pueden detectarse por medios sencillos, como un dedo, un palillo de dientes o un hisopo de algodón; la inspección visual de las rebabas incluye el uso de lupas y microscopios. Aún no hay estándares aceptados para definir específicamente lo que es una rebaba, en parte debido a la variedad de las que se desarrollan en las piezas.

Las rebabas tienen varias desventajas: (a) interfieren con el ensamblado mecánico de las partes y pueden estorbarlas y deslinearlas, así como causar cortocircuitos en componentes eléctricos. (b) Debido a que por lo general son agudas, constituyen un riesgo para la seguridad del personal que maneja las partes. (c) Reducen la vida de fatiga de los componentes. (d) Las placas de metal tienen menos flexibilidad si la rebaba se encuentra en el lado de la tensión (vea la sección 16.2). Por otra parte, las rebabas en componentes delgados taladrados o con ahusamientos, como las partes diminutas de los relojes mecánicos y de otro tipo, provocan un espesor adicional y mejoran el par que sujeta los tornillos.

Se dispone de **varios procesos** para eliminar rebabas. Su rentabilidad depende de factores como el grado en que es necesario eliminarlas, la complejidad de la parte, ubicación de la rebaba, número de partes por limpiar, espacio disponible en el taller, costos de mano de obra y consideraciones de seguridad y ambientales. Entre las operaciones para eliminar rebabas están:

1. Eliminación manual, con limas y rasquetas. Sin embargo, se estima que la eliminación manual contribuye hasta con el 10% del costo de manufactura de la parte.
2. Eliminación mecánica, por maquinado de piezas tales como partes cilíndricas en un eje rotatorio.
3. Cepillado con alambre o con cepillos giratorios de nailon, que constan de filamentos incrustados con arenillas abrasivas.
4. Uso de bandas abrasivas.
5. Maquinado ultrasónico.
6. Electropulido.
7. Maquinado electroquímico.
8. Acabado magnético-abrasivo.
9. Acabado vibratorio.

10. Chorro abrasivo.
11. Maquinado con flujo abrasivo, como la extrusión de una solución abrasiva semisólida sobre los bordes de la parte.
12. Energía térmica, utilizando láseres o plasma.

A continuación se describen los últimos cuatro procesos; otros más se cubren en otras partes del libro.

Acabado vibratorio y de barril. Estos procesos se usan para eliminar rebabas de grandes cantidades de piezas de trabajo relativamente pequeñas. Ésta es una operación por lotes, en la que se colocan en un contenedor *partículas abrasivas* especialmente conformadas, de medios no metálicos o metálicos (piedras o esferas) junto con las partes que se van a limpiar de rebabas. Después se hace *vibrar* o *rodar* el contenedor por diferentes medios mecánicos. El impacto de los abrasivos individuales o de las partículas de metal elimina las rebabas y los bordes afilados de las partes. En función de la aplicación, éste puede ser un proceso *en seco* o *húmedo*; pueden agregarse componentes líquidos para propósitos como la disminución o aumento de la resistencia a la corrosión de las partes que se limpiarán. Cuando se emplean fluidos y abrasivos químicamente activos, este proceso es una forma de pulido químico-mecánico.

Chorro abrasivo. También llamado **chorro de arena** o **arenado (sanblasteo)**, este proceso involucra partículas abrasivas (generalmente arena) que son impulsadas por una corriente de aire a gran velocidad o por una rueda giratoria y dirigidas hacia la superficie de la pieza de trabajo. El chorro abrasivo es especialmente útil para eliminar las rebabas de los materiales metálicos y no metálicos y para raspar, limpiar y eliminar los óxidos de la superficie. Las superficies producidas tienen un acabado mate, pero puede haber daño para la superficie si los parámetros del proceso no se controlan en forma adecuada. El **chorro microabrasivo** consiste en pulir y grabar a pequeña escala, utilizando abrasivos muy finos, en unidades tipo banco.

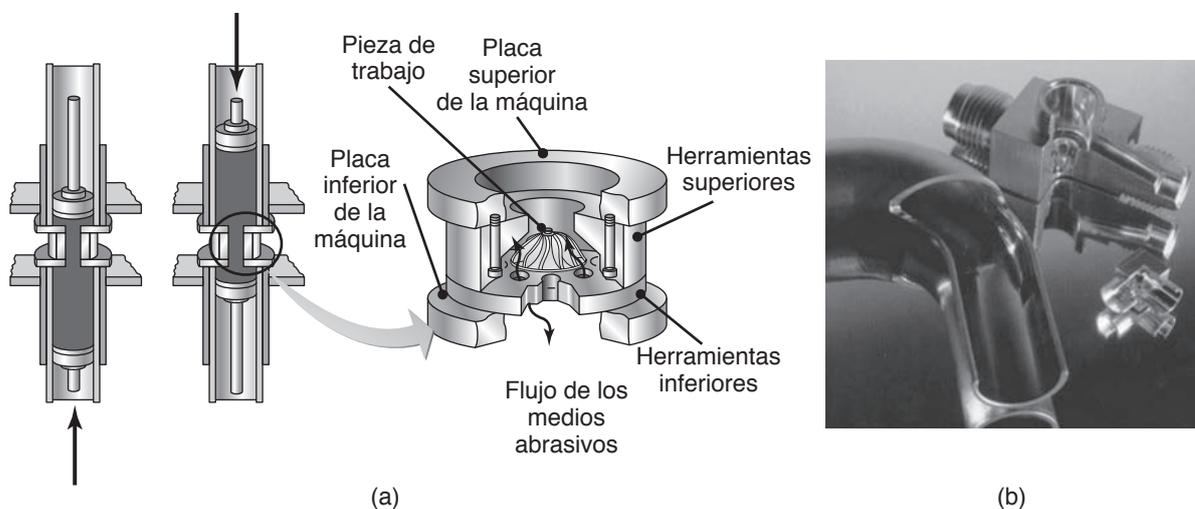


FIGURA 26.34 (a) Ilustración esquemática del maquinado con flujo abrasivo para eliminar las rebabas en un propulsor de turbina; las flechas indican el movimiento de los medios abrasivos; observe el arreglo especial de sujeción, que por lo general es distinto para cada diseño de parte. (b) Coples de válvulas tratados con maquinado por flujo abrasivo para eliminar las rebabas y mejorar la calidad de la superficie. *Fuente:* Cortesía de Kennametal Extrude Hone Corporation.

Maquinado con flujo abrasivo.

Este proceso involucra el uso de granos abrasivos, como carburo de silicio o diamante, que se mezclan en una matriz parecida al mastic y luego se fuerzan a avanzar hacia adelante y atrás por las aberturas y pasajes de la pieza de trabajo. El movimiento de la matriz abrasiva bajo presión erosiona tanto las rebabas como las esquinas agudas y pule la parte. El maquinado con flujo abrasivo (AFM, por sus siglas en inglés) es particularmente apropiado para piezas de trabajo con cavidades internas como las que se producen por fundición y que son inaccesibles por otros medios. Las presiones que se aplican van de 0.7 a 22 MPa (100 a 3200 psi).

Las superficies externas también pueden limpiarse con este método, introduciendo la pieza de trabajo dentro de un arreglo que dirige el medio abrasivo a las aristas y áreas por limpiar. En la figura 26.34 se ilustra la eliminación de rebabas de un propulsor de turbina con este proceso.

En el **maquinado de flujo microabrasivo**, la mecánica del proceso es parecida a la del maquinado normal con flujo abrasivo, pero con medios abrasivos mucho más pequeños y portadores menos viscosos, lo que permite que los medios fluyan a través de agujeros muy estrechos con tamaños que van de $50\ \mu\text{m}$ (0.002 pulg) a $750\ \mu\text{m}$ (0.030 pulg) de diámetro. El micro AFM se ha aplicado a la producción de inyectores de diesel de alta calidad y de otras boquillas finas, donde una rebaba o rugosidad en la superficie podría perjudicar la calidad del flujo.

Eliminación de rebabas con energía térmica. Este proceso consiste en la colocación de la parte en una cámara que luego se inyecta con una mezcla de gas natural y oxígeno. Cuando la mezcla hace ignición se produce un golpe de calor con una temperatura cercana a $3300\ ^\circ\text{C}$ ($6000\ ^\circ\text{F}$). Las rebabas se calientan y funden instantáneamente (vea la figura 26.35), en tanto que la temperatura del conjunto de la parte apenas alcanza unos $150\ ^\circ\text{C}$ ($300\ ^\circ\text{F}$). Sin embargo este proceso tiene desventajas: (a) las rebabas largas tienden a formar gotas después de fundidas; (b) las partes delgadas y esbeltas se pueden distorsionar y (c) el proceso no pule ni da brillo a las superficies de las piezas de trabajo, algo que sí hacen algunos de los otros procesos empleados para eliminar rebabas.

Eliminación de rebabas robotizada. La eliminación de rebabas y la remoción de quemaduras de los productos terminados se llevan a cabo cada vez más por medio de *robots programables* (sección 37.6), con el uso de un sistema de retroalimentación de fuerza para controlar la trayectoria y tasa de remoción de las rebabas. Este método elimina el trabajo manual tedioso y caro y da como resultado una limpieza más consistente y repetible. Un ejemplo de esto es la eliminación robotizada de rebabas (vea también la sección 37.6.3) de una carcasa fundida para motor fuera de borda que se ilustra en la figura 26.36. En otra aplicación, la eliminación manual de las rebabas de un engrane de doble hélice para la caja de velocidades de un helicóptero se llevó a cabo en 150 minutos, en tanto que con un robot se requirieron 15 minutos.



FIGURA 26.35 Ejemplo de eliminación de rebabas con energía térmica. Fuente: Cortesía de Kennametal Extrude Hone Corporation.

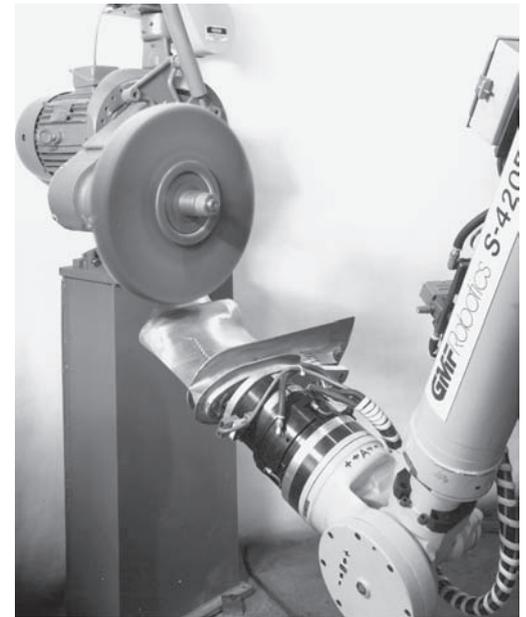


FIGURA 26.36 Operación con un robot de limpieza de rebabas en una carcasa fundida de un motor fuera de borda; la operación usa una piedra abrasiva. Para estas operaciones también pueden usarse bandas abrasivas (figura 26.28) o cepillos radiales abrasivos flexibles. Fuente: Cortesía de Acme Manufacturing Company.

26.9 Economía de las operaciones de maquinado y acabado con abrasivos

En ocasiones se necesitan operaciones de maquinado abrasivo y de acabado porque los procesos de formado, moldeo y maquinado por sí solos no producen superficies suficientemente exactas en cuanto a sus dimensiones o suavidad. Los procesos abrasivos se pueden usar tanto para dar acabado como para remover material a gran escala. Por ejemplo, el rectificado con avance lento es una alternativa económica para las operaciones de maquinado como fresado o brochado, aun cuando el desgaste de la piedra abrasiva sea grande.

Se han hecho muchos avances en la automatización del equipo involucrado en estas operaciones, incluyendo el uso de controles computarizados, sensores, optimización del proceso y manejo robotizado de las partes. En consecuencia, los costos de la mano de obra y los tiempos de producción se han reducido a pesar de que ese tipo de maquinaria por lo general requiere una mayor inversión de capital.

Dado que son operaciones adicionales, los procesos descritos en este capítulo afectan de manera significativa el costo del producto, en especial porque muchos de ellos son relativamente lentos. Además, a medida que se incrementan los requerimientos de acabado de la superficie, se necesitan más operaciones, lo que eleva los costos de producción, como se ve con claridad en la figura 26.37; observe cómo crece con rapidez el costo conforme el acabado de la superficie mejora con procesos adicionales como rectificado y asentado.

El costo total de las operaciones abrasivas depende de varios factores, como el tamaño de la parte, su forma, acabado de la superficie y exactitud dimensional requerida, así como de la maquinaria, herramientas, accesorios y mano de obra involucrada. En tanto que los costos de la maquinaria son elevados para el rectificado, los de la que se usa en los procesos de acabado son bajos. Los costos de una piedra abrasiva por lo general son bajos en comparación con otros aspectos de la operación conjunta de rectificado. Sin embargo, como se dijo en este capítulo, el costo de las piedras abrasivas puede llegar a ser de cientos o incluso miles de dólares, lo que depende de su composición y tamaño.

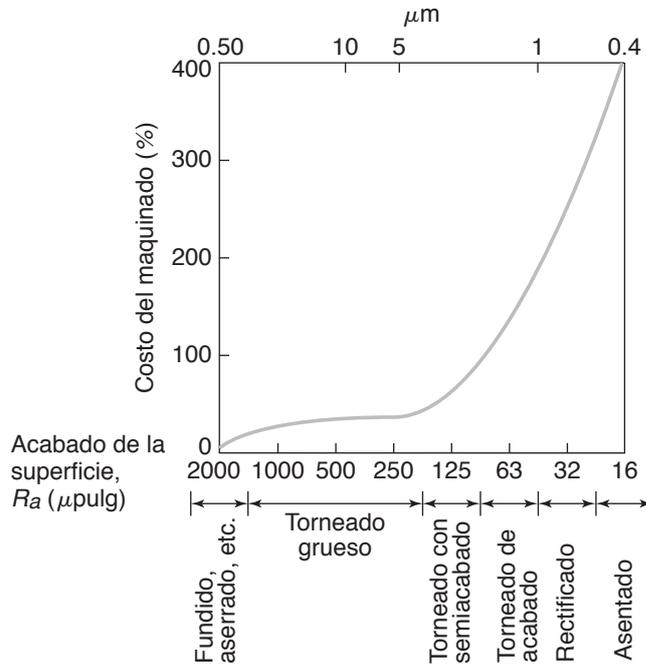


FIGURA 26.37 Incremento del costo del maquinado y acabado de una parte como función del acabado de la superficie que se requiere; ésta es la principal razón de que el acabado que se especifique para la superficie de las partes no deba ser más fino de lo que se requiera para que la parte lleve a cabo su función en forma apropiada.

Los costos de las herramientas de acabado, como el asentado y lapeado, varían mucho y los de la mano de obra y la habilidad del operador dependen en gran medida de lo automatizado que esté el equipo.

Si es probable que el acabado sea un factor importante en la manufactura de un producto en particular, las etapas conceptual y original del diseño deben involucrar un análisis del nivel de acabado de la superficie y la exactitud dimensional que se requieren, y si pueden no ser tan estrictas. Además, todos los procesos que preceden a las operaciones de acabado deben analizarse en cuanto a su capacidad para producir características más aceptables de la superficie. Esto se logra por medio de la selección apropiada de las herramientas, los parámetros del proceso, fluidos para el trabajo de metales y características de las máquinas herramienta, su nivel de automatización, controles computarizados, y de los dispositivos de sujeción del trabajo involucrados.

RESUMEN

- Es frecuente que el maquinado abrasivo sea necesario y económico cuando la dureza y resistencia de la pieza de trabajo son elevadas, los materiales frágiles y los requerimientos para el acabado de la superficie y las tolerancias dimensionales altos.
- Los abrasivos convencionales consisten en óxido de aluminio y carburo de silicio; los superabrasivos consisten en nitruro de boro cúbico y diamante. La friabilidad de los granos abrasivos es un factor importante para determinar su rendimiento, al igual que la forma y tamaño de los granos.
- Las piedras abrasivas, también conocidas como abrasivos aglutinados en contraste con los sueltos, consisten en una combinación de granos abrasivos y agentes aglutinadores. Características importantes de las piedras abrasivas son el tipo del grano abrasivo y el aglutinante, grado y dureza. Las piedras abrasivas también pueden reforzarse para mantener su integridad, siempre y cuando se desarrollen grietas durante su uso.
- El desgaste de la piedra abrasiva es una consideración importante en la calidad e integridad de la superficie del producto procesado. El afilado y ajuste de las piedras son operaciones necesarias y se realizan con varias técnicas.
- Hay varios procesos de maquinado abrasivo y máquinas para efectuar el rectificado superficial, externo e interno. El maquinado abrasivo también se utiliza para los procesos de remoción de material a gran escala, como el rectificado con avance lento, y es competitivo con procesos de maquinado como el fresado y el torneado.
- La selección de los abrasivos y las variables del proceso, incluyendo los fluidos, es importante para obtener el acabado que se desea para la superficie, así como la exactitud dimensional. De otro modo puede haber daño para las superficies, como el quemado, agrietamiento térmico, esfuerzos residuales y marcas de traqueteo.
- Se cuenta con varias operaciones de acabado para mejorar el terminado de las superficies. Debido a que afectan de manera significativa el costo del producto, es importante la selección e implementación apropiadas de estas operaciones.
- La eliminación de rebabas es necesaria para ciertos componentes terminados. Los métodos más comunes son el acabado vibratorio, de barril y chorro abrasivo, aunque también está el de energía térmica y otros más.

TÉRMINOS CLAVE

Abrasivos	Abrillantado	Acabado vibratorio	Aglutinante vitrificado
Abrasivos aglutinados	Acabado	Afilado	Agrietamiento térmico
Abrasivos recubiertos	Acabado de cañón	Aglutinante resinoide	Ajuste

Asentado	Energía específica	Nitruro de boro cúbico	Quemadura metalúrgica
Cara de desgaste	Estructura de la piedra	Nitruro de silicio	Rebaba
Carga	Facilidad de rectificado	Número de malla	Rectificado
Cepillado con alambre	Friabilidad	Óxido de aluminio	Rectificado con avance lento
Chispas	Gel sembrado	Piedras de corte libre	Rectificado con banda
Chorro abrasivo (chorro con arena o arenado)	Grado	Piedras reforzadas	Rectificado de bajo esfuerzo
Desgarramiento	Lapeado	Profundidad de corte de la piedra	Rectificado de régimen dúctil
Desgaste por rozamiento	Maquinado giratorio ultrasónico	Profundidad de corte del grano	Relación de rectificado
Diamante	Maquinado por flujo abrasivo	Pulido	Revenido
Dureza de la piedra	Maquinado por flujo microabrasivo	Pulido asistido por campo magnético	Sonotrodo
Electropulido	Maquinado ultrasónico	Pulido por flotación magnética	Superabrasivos
Eliminación de rebabas	Marcas de traqueteo	Pulido químico-mecánico	Superacabado
Eliminación de rebabas robotizada	Microreplicas	Quemado	Tamaño del grano
			Vidriado

BIBLIOGRAFÍA

- Astashev, V. K. y Babitsky, V. I., *Ultrasonic Processes and Machines*, Springer, 2010.
- Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
- Gillespie, L. K., *Deburring and Edge Finishing Handbook*, Society of Manufacturing Engineers/American Society of Mechanical Engineers, 2000.
- Hwa, L. S., *Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing*, Academic Press, 1999.
- Jackson, M. J. y Davim, M. J., *Machining with Abrasives*, Springer, 2010.
- Krar, S. y Ratterman, E., *Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond*, McGraw-Hill, 1990.
- Kuchle, A., *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*, Springer, 2009.
- Malkin, S. y Guo, C., *Grinding Technology*, 2a. ed., Industrial Press, 2008.
- Marinescu, I. D., Hitchiner, M., Uhlmann, E. y Rowe, W. B. (eds.), *Handbook of Machining with Grinding Wheels*, CRC Press, 2006.
- Marinescu, I. D., Tonshoff, H. K. e Inasaki, I., *Handbook of Ceramic Grinding & Polishing*, William Andres, 2000.
- Marinescu, I. D., Uhlmann, E. y Doi, T. (eds.), *Handbook of Lapping and Polishing*, CRC Press, 2006.
- Oliver, M. R., *Chemical Mechanical Planarization of Semiconductor Materials*, Springer, 2004.
- Rowe, W. B., *Principles of Modern Grinding Technology*, William Andrew, 2009.
- Webster, J. A., Marinescu, I. D. y Trevor, T. D., *Abrasive Processes*, Marcel Dekker, 1999.

PREGUNTAS DE REPASO

- 26.1** ¿Qué es un abrasivo? ¿Qué son los superabrasivos?
- 26.2** ¿Cómo se relaciona el tamaño del grano de un abrasivo con su número?
- 26.3** ¿Por qué se fabrican sintéticamente la mayor parte de abrasivos?
- 26.4** Describa la estructura de una piedra abrasiva y sus características.
- 26.5** Explique las características de cada tipo de adhesivo utilizado en los abrasivos aglutinados.
- 26.6** ¿Qué causa las chispas durante el rectificado? ¿Es útil observarlas? Explique.
- 26.7** Defina el término quemadura metalúrgica.
- 26.8** Defina (a) friabilidad, (b) cara de desgaste, (c) relación de rectificado, (d) ajuste y (e) afilado.
- 26.9** ¿Qué es el rectificado con avance lento y cuáles son sus ventajas?
- 26.10** ¿En qué se distingue el rectificado sin centro del rectificado cilíndrico?
- 26.11** ¿Cuáles son las diferencias entre los abrasivos recubiertos y los aglutinados?
- 26.12** ¿Cuál es el propósito de la solución acuosa en el pulido químico-mecánico?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 26.13** Explique por qué las operaciones de rectificado pueden ser necesarias para componentes que se han maquinado previamente.
- 26.14** ¿Por qué hay tan amplia variedad de tipos, formas y tamaños de piedras abrasivas?
- 26.15** Explique las razones de la gran diferencia entre las energías específicas implicadas en el maquinado (tabla 21.2) y en el rectificado (tabla 26.2).
- 26.16** La relación de rectificado, G , depende del tipo de piedra abrasiva, dureza de la pieza de trabajo, profundidad de corte de la piedra, velocidades de la piedra y la pieza de trabajo y tipo de fluido para rectificar. Explique.
- 26.17** ¿Cuáles son las consecuencias de permitir que la temperatura suba durante el rectificado? Explique.
- 26.18** Explique por qué las velocidades son mucho mayores en el rectificado que en las operaciones de maquinado.
- 26.19** Se dijo que el maquinado ultrasónico es más apropiado para materiales duros y frágiles. Explique.
- 26.20** Explique por qué las partes con formas irregulares, esquinas agudas, oquedades profundas y proyecciones puntiagudas son difíciles de pulir.
- 26.21** Enumere las operaciones de acabado que es común utilizar en las operaciones de manufactura. ¿Por qué son necesarias? Explique por qué deben minimizarse.
- 26.22** En relación con los capítulos anteriores acerca del procesamiento de materiales, enumere las operaciones en las cuales pueden desarrollarse rebabas en las piezas de trabajo.
- 26.23** Explique las razones de que con el tiempo se hayan desarrollado muchas operaciones para eliminar las rebabas.
- 26.24** ¿Qué precauciones deben tomarse al rectificar con alta precisión? Haga comentarios sobre la máquina, parámetros del proceso, piedra abrasiva y fluidos para rectificar.
- 26.25** Describa los factores involucrados en el hecho de que la piedra abrasiva trabaje “suave” o “duro”.
- 26.26** ¿Qué factores contribuirían al traqueteo en el rectificado? Explique.
- 26.27** En general, es recomendable que al rectificar aceros endurecidos la piedra abrasiva sea de un grado relativamente suave. Explique.
- 26.28** En la figura 26.5 están indicadas las caras apropiadas para rectificar para cada tipo de piedra. Explique por qué las otras superficies de la piedra no deben usarse y las consecuencias que tendría hacerlo.
- 26.29** Describa los efectos de una cara de desgaste en el conjunto de la operación de rectificado.
- 26.30** ¿Qué dificultades, si las hubiera, podrían encontrarse en el rectificado de termoplásticos? ¿Termofijos? ¿Cerámicos?
- 26.31** Observe los patrones del ciclo en la figura 26.22 y comente acerca de por qué siguen éstos en particular.
- 26.32** ¿Cuáles de los procesos descritos en el capítulo son apropiados particularmente para piezas de trabajo hechas de (a) cerámicos; (b) termoplásticos y (c) termofijos? ¿Por qué?
- 26.33** El rectificado puede producir un acabado muy fino de la superficie de una pieza de trabajo. ¿Es este acabado necesariamente una indicación de la calidad de la parte? Explique.
- 26.34** Ciertas aplicaciones de joyería requieren rectificar diamantes a sus formas deseadas. ¿Cómo se hace esto, puesto que el diamante es el material más duro que se conoce?
- 26.35** Enumere y explique los factores que contribuyen a un acabado defectuoso de la superficie en los procesos descritos en este capítulo.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

- 26.36** Calcule las dimensiones de la viruta en el rectificado de superficie para las siguientes variables del proceso; $D = 10$ pulg, $d = 0.001$ pulg, $v = 100$ pies/min, $V = 5000$ pies/min, $C = 500$ por pulg² y $r = 20$.
- 26.37** Si la resistencia del material de una pieza de trabajo se duplica, ¿cuál debe ser el porcentaje de disminución en la profundidad de corte de la piedra, d , con el fin de mantener la misma fuerza en el grano si todas las demás variables permanecen sin cambio?
- 26.38** Suponga que se lleva a cabo una operación de rectificado de una superficie con las siguientes condiciones: $D = 200$ mm, $d = 0.1$ mm, $v = 40$ m/min y $V = 2000$ m/min. Después, estas condiciones cambian como sigue: $D = 150$ mm, $d = 0.1$ mm, $v = 30$ m/min y $V = 2500$ m/min. ¿Qué tan diferente es el aumento de la temperatura a partir del incremento que ocurre con las condiciones iniciales?
- 26.39** Estime el aumento porcentual en el costo de la operación de rectificado si la especificación para el acabado de la superficie de una parte cambia de 250 a 32 μ pulg.
- 26.40** Suponga que el costo de la energía para rectificar una parte de aluminio con un requerimiento energético específico de 8 W-s/mm³ es de \$1.50 por pieza. ¿Cuál sería el costo de la energía para ejecutar la misma operación si el material de la pieza de trabajo fuera acero para herramienta TI5?
- 26.41** Al describir los procesos de rectificado, no se dieron las ecuaciones que relacionan avances, velocidades, tasas de remoción de material, tiempo total de rectificado, etc., como sí se dieron en las operaciones de torneado y fresado en los capítulos

23 y 24. Estudie las relaciones cuantitativas involucradas y desarrolle dichas ecuaciones para las operaciones de rectificado.

26.42 ¿Cuáles serían las respuestas para el ejemplo 26.1 si la pieza de trabajo fuera titanio de alta resistencia y el ancho del corte fuera $w = 0.75$ pulg? Dé sus respuestas en newtons.

26.43 Se sabe que en el rectificado el calentamiento ocurre cuando se rectifica con una velocidad del eje de 5000 rpm, un diámetro de la piedra de 8 pulg y profundidad de corte de 0.0015 pulg para una tasa de avance de 50 pies/min. Por esta razón, el procedimiento estándar de operación es mantener la velocidad del eje en 3500 rpm. Si se usa una nueva piedra de 10 pulg de diámetro, ¿qué velocidad del eje se puede utilizar antes de que ocurra el calentamiento? ¿Qué velocidad del eje debe

usarse para mantener las mismas temperaturas al rectificar que las que había en las condiciones existentes de operación?

26.44 Una operación de rectificado se realiza con una piedra de 10 pulg, con velocidad de eje de 4000 rpm. La tasa de avance de la pieza de trabajo es de 50 pies/min y la profundidad del corte es de 0.002 pulg. Los termómetros de contacto registran una temperatura máxima aproximada de 1800 °F. Si la pieza de trabajo es acero, ¿cuál es la temperatura si la velocidad se incrementa a 5000 rpm? ¿Cuál es si la velocidad es de 10 000 rpm?

26.45 Obtenga una expresión para la velocidad angular de la oblea que se muestra en la figura 26.30b como función del radio y la velocidad angular de la almohadilla en el pulido químico-mecánico.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

26.46 Con dibujos apropiados, describa los principios de varios métodos y dispositivos de sujeción que pueden usarse para los procesos descritos en este capítulo.

26.47 Construya una tabla descriptiva de las capacidades del proceso de las operaciones del maquinado abrasivo. Use varias columnas para describir las características de las máquinas involucradas, tipo de herramientas abrasivas utilizadas, formas del material en bruto y las partes producidas, tamaños máximo y mínimo que sean comunes, acabado de la superficie, tolerancias y tasas de producción.

26.48 Las piedras abrasivas vitrificadas (también llamadas piedras de cerámicos) usan un aglutinante parecido al vidrio para mantener unidos los granos abrasivos. Dado su entendimiento de la manufactura de partes de cerámicos (descrita en el capítulo 18), enumere los métodos de producir piedras vitrificadas.

26.49 Suponga que usted es un profesor que expone los temas de este capítulo y aplicará un examen sobre los aspectos numéricos para evaluar la comprensión de los estudiantes. Prepare tres problemas cuantitativos y aporte las respuestas.

26.50 Haga una investigación bibliográfica y explique cómo puede ser útil observar el color, la brillantez y forma de las chispas producidas al rectificar para identificar el tipo de material que se trabaja y su condición.

26.51 Visite una tlapalería grande e inspeccione las piedras abrasivas que se exhiban. Tome nota de las leyendas en ellas y sobre la base del sistema de notación que se presenta en la figura 26.6, haga comentarios sobre sus observaciones, inclusive los tipos más comunes de piedras existentes en la tienda.

26.52 Obtenga una piedra abrasiva pequeña o un trozo de una grande. (a) Con una lupa o microscopio, observe sus superficies y compárelas con la figura 26.9. (b) Talle la piedra abrasiva contra varios materiales planos metálicos y no metálicos. Describa sus observaciones acerca de las superficies producidas.

26.53 Al revisar los procesos de maquinado abrasivo en este capítulo, habrá notado que algunos usan abrasivos aglutinados, en tanto que otros involucran abrasivos sueltos. Elabore dos listas separadas para estos procesos y comente sobre sus observaciones.

26.54 Obtenga trozos de papel y tela de lija de diferentes gruesos. Use una lupa o microscopio para observar las características de la superficie y compárelas con la figura 26.25.

26.55 Con base en el contenido de este capítulo, describa sus reflexiones acerca de si es posible o no diseñar y construir un “centro de rectificado” (vea el capítulo 25). Comente las dificultades que se encontrarían con tales máquinas y operaciones.

Procesos de maquinado avanzado y sus equipos

CAPÍTULO 27

- Con frecuencia es necesario maquinar o terminar productos elaborados con materiales muy duros o resistentes; en este caso las estrategias de maquinado y rectificado convencionales descritas hasta este momento no son prácticas.
- Este capítulo describe procesos de maquinado avanzado que se basan en medios no mecánicos de remoción de material. El capítulo comienza con el estudio de procesos de preparación del material en bruto por medio de maquinado químico y fotoquímico, en los cuales se remueve material a través de la acción corrosiva de un fluido.
- Después se describen el maquinado y rectificado electroquímico, con los que se retira material por la acción de una fuente de energía eléctrica y transferencia de iones dentro de un fluido electrolítico. El maquinado por descarga eléctrica remueve material al fundir con chispas pequeñas porciones de la pieza de trabajo.
- También se describen los procesos de maquinado con rayo láser y haz de electrones, así como con chorros de agua y abrasivo, presentando ejemplos de sus aplicaciones únicas.
- El capítulo termina con una revisión de las tendencias del maquinado híbrido y la economía de los procesos de maquinado avanzado.

Partes que es común elaborar: cubiertas para misiles y aeronaves, álabes de turbinas, boquillas, partes con cavidades complejas y barrenos profundos de diámetro pequeño, dados, corte de placas metálicas con láser, corte de partes gruesas metálicas y no metálicas.

Métodos alternativos: maquinado abrasivo, maquinado ultrasónico y maquinado de precisión.

27.1 Introducción

Los procesos de maquinado descritos en los capítulos anteriores implican la remoción de material por medios mecánicos de formación de viruta, por abrasión o microvirutas. Sin embargo, hay situaciones en las que los métodos mecánicos no son satisfactorios, económicos o posibles, por las siguientes razones:

- La **resistencia** y **dureza** del material de la pieza de trabajo son muy grandes, en general por arriba de 400 HB (vea la figura 2.15).
- El material es demasiado **frágil** para ser maquinado sin que sufra daño la parte, lo que es común en el caso de aleaciones tratadas térmicamente a profundidad, vidrio, cerámicos y partes obtenidas con metalurgia de polvos.
- La pieza de trabajo es **demasiado flexible** o esbelta como para soportar las fuerzas involucradas en el maquinado o rectificado, o las partes son difíciles de fijar en los accesorios y dispositivos de sujeción.

- 27.1 **Introducción** 769
- 27.2 **Maquinado químico** 770
- 27.3 **Maquinado electroquímico** 775
- 27.4 **Rectificado electroquímico** 779
- 27.5 **Electroerosión** 780
- 27.6 **Maquinado con rayo láser** 784
- 27.7 **Maquinado con haz de electrones** 787
- 27.8 **Maquinado con chorro de agua** 788
- 27.9 **Maquinado con chorro abrasivo** 790
- 27.10 **Sistemas de maquinado híbrido** 790
- 27.11 **Economía de los procesos de maquinado avanzado** 791

EJEMPLO:

- 27.1 **Combinación de corte con rayo láser y punzonado de una placa de metal** 786

CASOS DE ESTUDIO:

- 27.1 **Maquinado electroquímico de un implante biomédico** 777
- 27.2 **Manufactura de pequeños satélites** 791

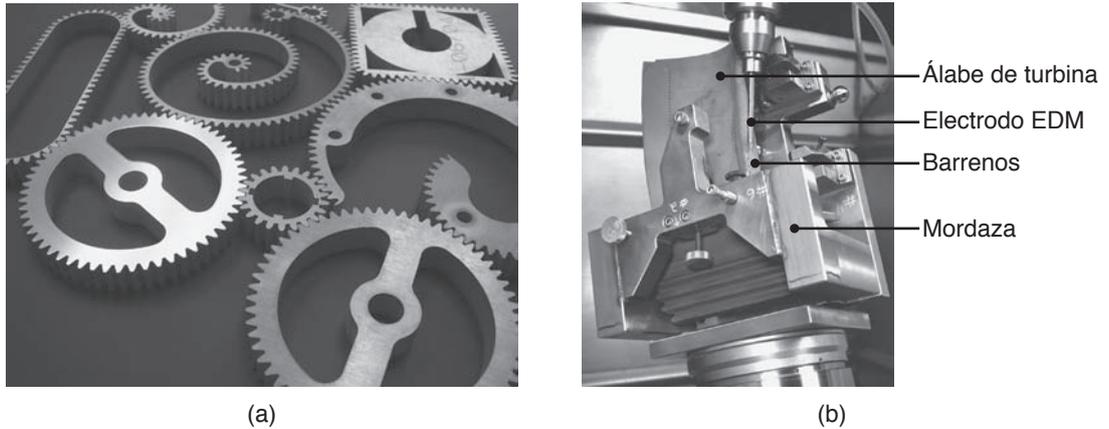


FIGURA 27.1 Ejemplos de partes elaboradas con procesos de maquinado avanzado. (a) Muestras de partes producidas por corte con chorro de agua. (b) Álabes de turbina, producida por maquinado de inmersión en descarga eléctrica; los barrenos se producen por maquinado con descarga eléctrica. *Fuente:* (a) Cortesía de OMAX Corporation; (b) cortesía de HI-TEK Mfg., Inc.

- La parte **tiene forma compleja** (figura 27.1), incluso con características como perfiles o barrenos internos y externos o razones elevadas de longitud a diámetro en materiales muy duros.
- Requerimientos especiales de **acabado superficial** y **tolerancia dimensional** que no se pueden obtener con otros procesos de manufactura, o que no son económicamente viables.
- El **aumento de temperatura** durante el procesamiento y los **esfuerzos residuales** desarrollados en la pieza de trabajo no son aceptables.

Cuando comenzaron en la década de 1950, estas dificultades llevaron al desarrollo de fuentes de energía química, eléctrica, de láser y haz de alta energía para remover material de piezas de trabajo metálicas o no metálicas, como se observa en la tabla 27.1. Estos procesos también reciben el nombre de maquinado *no tradicional* o *no convencional* y retiran material sin producir viruta, como ocurre en el maquinado y rectificado tradicionales, sino por medio de disolución química, grabado, fundido, evaporación y acción hidrodinámica, a veces con ayuda de partículas abrasivas finas.

Una gran ventaja de estos procesos es que su eficiencia es independiente de la dureza de la pieza de trabajo. Cuando se seleccionan y aplican en forma adecuada, es frecuente que los procesos de maquinado avanzado ofrezcan ventajas técnicas y económicas más grandes que las de los métodos tradicionales. Este capítulo describe dichos procesos, incluyendo sus características, aplicaciones comunes, limitaciones, calidad del producto, exactitud dimensional, acabado de la superficie y economía.

27.2 Maquinado químico

El *maquinado químico* (CM, por sus siglas en inglés) se basa en la observación de que los productos químicos atacan y corroen a la mayor parte de materiales, con lo que remueven pequeñas cantidades de material de la superficie. El proceso de CM se lleva a cabo por disolución química con el empleo de **reactivos** o de **ataque** con ácidos o soluciones alcalinas. El químico es el más antiguo de los procesos de maquinado avanzado y se ha usado para grabar metales y rocas duras, eliminar rebabas y en la producción de tarjetas de circuitos impresos y equipos microelectrónicos.

TABLA 27.1

Características generales de los procesos del maquinado avanzado		
Proceso	Características	Parámetros del proceso y tasa normal de remoción de material o velocidad de corte
Maquinado químico (CM)*	Remoción poco profunda en grandes superficies planas o curvadas; preparación de placas delgadas; bajo costo de herramientas y equipo; apropiado para corridas de poca producción.	0.0025 a 0.1 mm/min (0.0001 a 0.004 pulg/min).
Maquinado electroquímico (ECM*)	Formas complejas con cavidades profundas; tiene la tasa más elevada de remoción de material entre los procesos no tradicionales; costo elevado de herramientas y equipo; mucho consumo de energía; cantidad de producción de media a alta.	V: 5 a 25 C. D.; A: 1.5 a 8 A/mm ² ; 2.5 a 12 mm/min (0.1 a 0.5 pulg/min), en función de la densidad de la corriente.
Rectificado electroquímico (ECG*)	Corte y conformado de materiales duros, como herramientas de carburo de tungsteno; también se usa como proceso para asentar; tiene una tasa de remoción de material más alta que el rectificado.	A: 1 a 3 A/mm ² ; es común 25 mm ³ /s (0.0016 pulg ³ /s) por 1000 A.
Electroerosión o maquinado por descarga eléctrica (EDM*)	Formado y corte de partes complejas hechas de materiales duros; puede resultar cierto daño en la superficie; también se usa como proceso de rectificado y tronzado; herramientas y equipos caros.	V: 50 a 380; A: 0.1 a 500; es común 300 mm ³ /min (0.02 pulg ³ /min).
Maquinado con descarga eléctrica por cable	Corte del contorno de superficies planas o curvadas; equipo caro.	Varía con el material y su espesor.
Maquinado con rayo láser (LBM*)	Corte y perforación de agujeros en materiales delgados; zona afectada por el calor; no requiere un vacío; equipo caro; consume mucha energía.	0.50 a 7.5 m/min (1.67 a 25 pies/min).
Microchorro láser	Chorro de agua guiado con láser, usa una corriente de 25 a 100 μm de diámetro para fresar o cortar; gran profundidad de campo; poco daño térmico por el maquinado con láser.	Varía con el material; hasta 20 mm en silicio, 2 mm en acero inoxidable; hasta 300 mm/s en 50 μm de espesor de silicio.
Maquinado con haz de electrones (EBM*)	Corte y perforación de agujeros en materiales delgados; barrenos y ranuras muy pequeños; zona afectada por el calor; requiere un vacío; equipo caro.	1 a 2 mm ³ /min (0.004 a 0.008 pulg ³ /h).
Maquinado con chorro de agua (WJM*)	Corte de todo tipo de materiales no metálicos; apropiado para cortar el contorno de materiales flexibles; no hay daño térmico; ruidoso.	Varía considerablemente con el material.
Maquinado con chorro de agua abrasivo (AWJM*)	Corte de capa única o múltiple de materiales metálicos y no metálicos.	Hasta 7.5 m/min (25 pies/min).
Maquinado con chorro abrasivo (AJM*)	Corte, ranurado, desbarbado, grabado y limpieza de materiales metálicos y no metálicos; tiende a redondear las esquinas agudas; puede ser peligroso.	Varía considerablemente con el material.

*Por sus siglas en inglés.

Fresado químico. En el *fresado químico* se producen cavidades poco profundas en placas, hojas, forjados y extrusiones, por lo general para reducir el peso total, como puede verse en la figura 27.2. El proceso se ha usado en una amplia variedad de metales, con profundidades de remoción de hasta 12 mm (0.5 pulg). El *ataque selectivo* por medio del reactivo químico en diferentes zonas de las superficies de trabajo se lleva a cabo con capas removibles de material, lo que se llama *enmascaramiento* (figura 27.3a), o por inmersión parcial de la parte en el reactivo.

El procedimiento para el fresado químico consiste en los siguientes pasos:

1. Si la parte por maquinar tiene esfuerzos residuales debidos al procesamiento anterior, primero deben eliminarse para impedir la deformación después del fresado químico.
2. Las superficies se desgrasan y limpian completamente con el fin de asegurar tanto la buena adhesión del material del enmascaramiento como una tasa uniforme de remoción de material; también deben eliminarse las escamas de tratamientos térmicos anteriores.

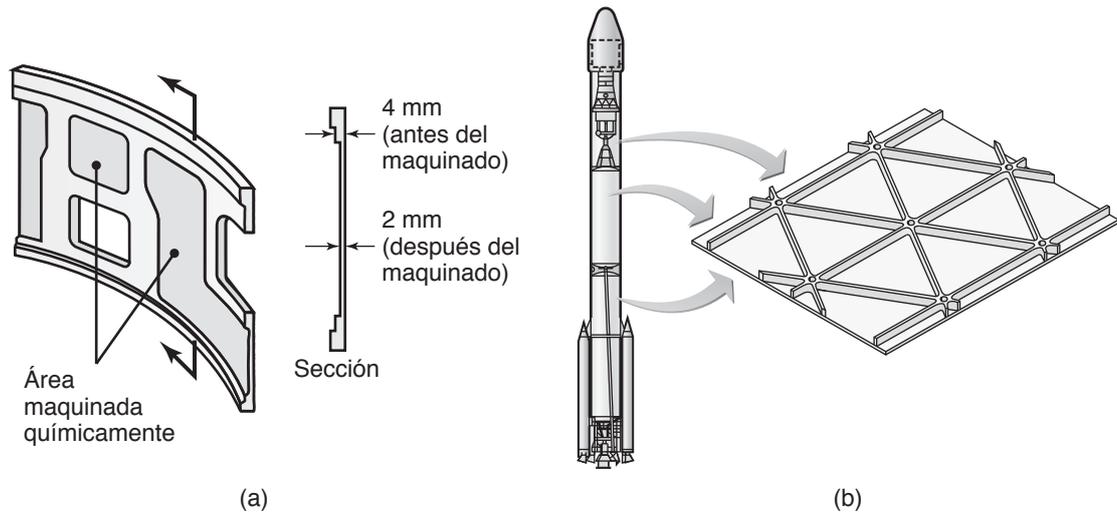


FIGURA 27.2 (a) Sección de la cubierta del panel de un misil contorneado con fresado químico para mejorar la razón de rigidez a peso de la parte. (b) Reducción del peso de vehículos espaciales con el fresado químico de sus placas de aleaciones de aluminio. Las placas se fresan químicamente después de haberseles dado la forma deseada en procesos como un rolado o el estirado.

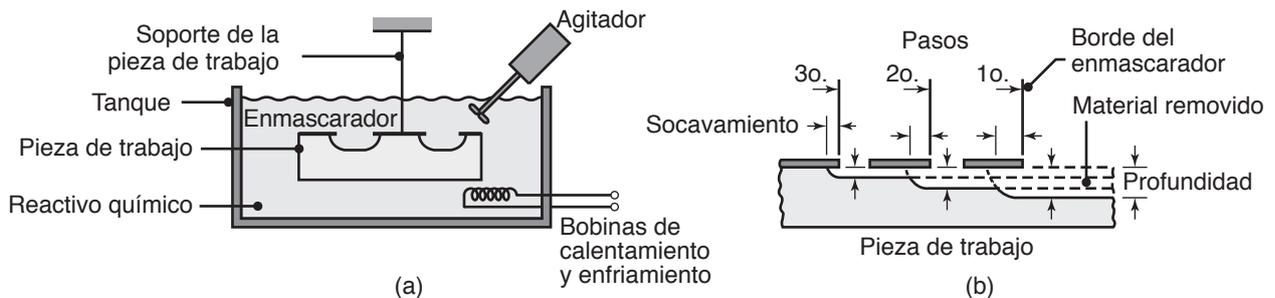


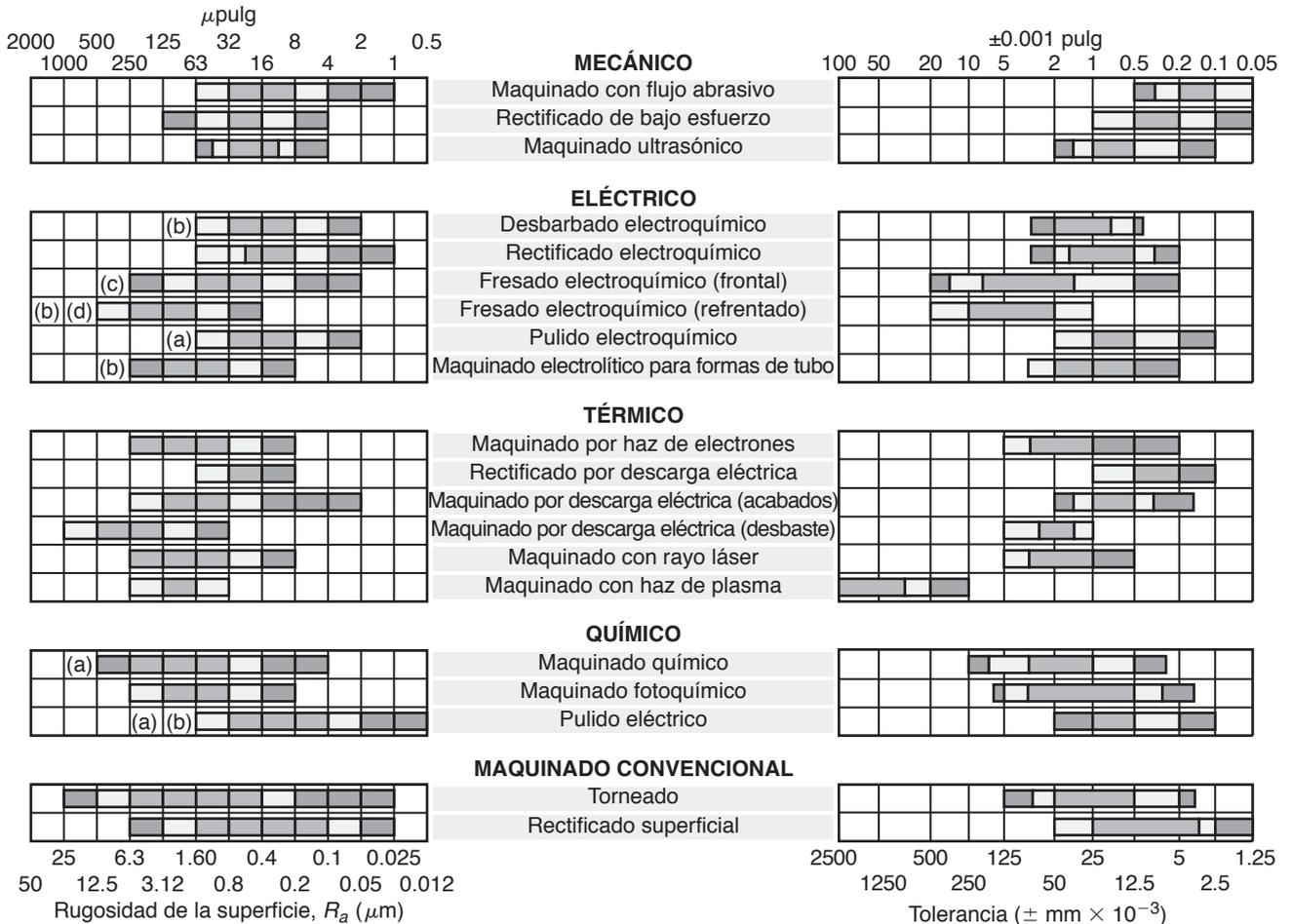
FIGURA 27.3 (a) Ilustración esquemática del proceso de maquinado químico; observe que este proceso no implica fuerzas o máquinas herramienta. (b) Etapas de la producción de una cavidad perfilada por maquinado químico; observe el socavamiento.

3. La mascarilla, o **enmascarador**, se aplica con cintas o pinturas, aunque también se utilizan elastómeros (hule y neopreno) y plásticos (cloruro de polivinilo, polietileno y poliestireno). Tenga presente que el enmascarador no debe reaccionar con el reactivo químico.
4. Las áreas de la mascarilla que requerirán ser maquinadas se eliminan con la técnica de trazado y descascarado.
5. Las superficies expuestas se maquinan químicamente, utilizando reactivos como hidróxido de sodio (para el aluminio), soluciones de ácidos hidroclicóric y nítrico (para aceros) y cloruro de hierro (para aceros inoxidables). Es importante controlar la temperatura y agitación (intensificación) del reactivo durante el fresado químico para eliminar de la parte una profundidad uniforme de material.
6. Después del maquinado, las partes se lavan enérgicamente con agua para impedir reacciones posteriores o la exposición de cualesquiera residuos del reactivo.
7. Se retira el resto del material de enmascaramiento y se limpia e inspecciona la parte. Observe que aunque el enmascarador no resulta afectado por el reactivo,

se puede disolver fácilmente con un solvente distinto y apropiado, como acetona o Piranha.

8. Se efectúan operaciones adicionales de acabado en las partes fresadas químicamente, como el maquinado con un flujo abrasivo (vea la sección 26.8) o galvanizado eléctrico (sección 34.9).
9. Esta secuencia de operaciones se puede repetir para producir cavidades en forma de escalón y diversos contornos (figura 27.3b).

El fresado químico se usa en la industria aeroespacial para eliminar capas someras de material de los grandes componentes de una aeronave, los paneles de la cubierta de misiles (figura 27.2) y partes extruidas para el fuselaje. Las capacidades de los tanques para los reactivos son de gran tamaño como 3.7 m × 15 m (12 pies × 50 pies). El proceso también se utiliza para fabricar dispositivos microelectrónicos y con frecuencia se le conoce como **grabado húmedo**. Los rangos del acabado superficial y la tolerancia obtenida por medio del maquinado químico y otros procesos de maquinado se muestran en la figura 27.4.



Nota: (a) Depende del estado de la superficie de inicio.
 (b) Las aleaciones de titanio por lo general son más rugosas que las de níquel.
 (c) Áreas de alta densidad de corriente.
 (d) Áreas de baja densidad de corriente.

■ Aplicación promedio (valores anticipados normalmente)
 □ Aplicación menos frecuente (condiciones inusuales o de precisión)
 ■ Raro (condiciones especiales de operación)

FIGURA 27.4 Rugosidad superficial y tolerancias obtenidas con diferentes procesos de maquinado; note el amplio rango de cada proceso (vea también la figura 23.13). Fuente: Basado en datos de *Machining Data Handbook*, 3a. ed. Copyright 1980.

El fresado químico puede ocasionar algún daño en la superficie debido al *grabado preferencial* o *ataque intergranular*, el cual perjudica las propiedades de las superficies. El fresado químico de estructuras soldadas y soldaduras en frío también llega a ocasionar la remoción dispereja del material, los fundidos pueden quedar con superficies irregulares debido a la porosidad y falta de uniformidad de las propiedades del material.

Troquelado químico. El *troquelado químico* es similar al troquelado de placas de metal (figura 16.4). Las aplicaciones comunes del troquelado químico son el grabado libre de rebaba de tarjetas de circuitos impresos, paneles decorativos y estampado de placas metálicas delgadas, así como la producción de formas complejas o muy pequeñas.

Troquelado fotoquímico. El *troquelado fotoquímico*, también llamado *fotograbado*, es una modificación del fresado químico. El material es removido, por lo general de una placa delgada y plana, con técnicas fotográficas, con el fin de producir una máscara, seguidas de maquinado químico. Pueden grabarse formas complejas, sin rebabas (figura 27.5) en láminas metálicas tan delgadas como de 0.0025 mm (0.0001 pulg). Este proceso, llamado **enmascaramiento fotoquímico**, también se usa para grabar, como en los conectores eléctricos o plantillas para soldadura por ola (sección 32.2.3).

El procedimiento del troquelado fotoquímico consiste en los siguientes pasos:

1. Se prepara el diseño de la parte por troquelar con un aumento de hasta 100x; luego se hace un negativo fotográfico y se reduce al tamaño de la parte terminada (llamada **arte final**). Note que el dibujo original (agrandado) permite que los errores de diseño inherentes disminuyan su tamaño en la cantidad de reducción (como 100x) en la imagen final del arte.
2. La lámina en bruto se recubre con un material fotosensible (**reactivo a la luz** que con frecuencia se llama *emulsión*), por medio de inmersión, atomización, fundición centrífuga o por rolado; después se seca en un horno.
3. Se coloca el negativo sobre la lámina recubierta y se expone a luz ultravioleta, lo que endurece las áreas expuestas.
4. Se desarrolla el troquelado por disolución de las áreas no recubiertas.
5. Después se sumerge el troquelado en un baño de reactivo (como en el fresado químico) o se rocía con éste, lo que graba las áreas expuestas.
6. Se retira el material de enmascaramiento y la parte se lava enérgicamente con agua para eliminar todos los residuos químicos.

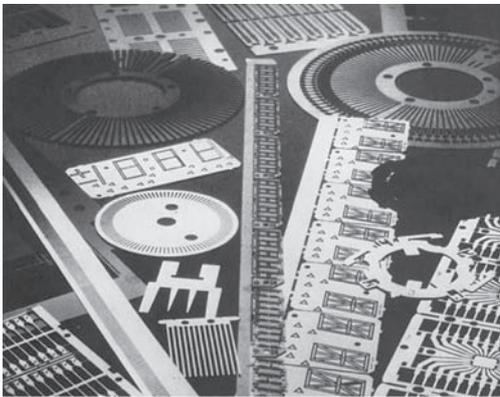


FIGURA 27.5 Distintas partes elaboradas por medio de troquelado químico; observe los detalles finos. *Fuente:* Cortesía de Buckbee-Mears, St. Paul, Minnesota.

El manejo de reactivos químicos requiere que se tomen precauciones y se tengan consideraciones especiales de seguridad para proteger a los trabajadores contra la exposición de productos químicos tanto líquidos como volátiles. Además, una gran desventaja de este proceso es la eliminación de subproductos químicos, aunque algunos se pueden reciclar.

Aunque se requiere mano de obra especializada, los costos de las herramientas son bajos, el proceso se puede automatizar y es económico para volúmenes de producción de medios a altos. El troquelado fotoquímico es capaz de producir partes muy pequeñas, en los casos en que es difícil producir dados de troquelado tradicionales (sección 16.2). El proceso también es eficaz para troquelar piezas de trabajo y materiales frágiles. Las tolerancias son del orden de 10% del espesor de la placa. Las aplicaciones comunes del troquelado fotoquímico incluyen pantallas metálicas finas, tarjetas de circuitos impresos, laminaciones de motores eléctricos, resortes planos y distintos componentes de sistemas miniaturizados.

Consideraciones de diseño para el maquinado químico. Los lineamientos generales para el maquinado químico son los siguientes:

- Deben evitarse los diseños que impliquen esquinas agudas, cavidades profundas y estrechas, ahusamientos muy marcados, costuras plegadas o materiales porosos en la pieza de trabajo ya que el agente de reactivo ataca de manera continua todas las superficies expuestas.
- Debido a los ataques del agente reactivo, pueden desarrollarse socavamientos en el material, en las direcciones tanto vertical como horizontal, como se ilustra en la figura 27.3, en áreas ubicadas bajo los bordes del enmascaramiento.
- Para mejorar la tasa de producción, de preferencia debe formarse toda la pieza de trabajo con otros procesos y con una tasa mayor de volumen, como el maquinado, antes de proceder al maquinado químico.
- Puede haber variaciones dimensionales debido a los cambios de tamaño en el patrón de la máscara depositada ocasionados por la humedad y temperatura. Estas variaciones se pueden minimizar si se seleccionan apropiadamente los medios del arte final y con el control tanto del ambiente en que éste se genera como en el área de producción en la planta.
- En el presente se hacen diseños de productos con sistemas asistidos por computadora (capítulo 38) y es posible traducirlos a un formato útil para la maquinaria de grabado.

27.3 Maquinado electroquímico

El *maquinado electroquímico* (ECM, por sus siglas en inglés) es básicamente lo contrario del galvanizado eléctrico (vea la sección 34.9). Un **electrolito** actúa como conductor de corriente (figura 27.6), y la alta tasa de flujo de electrolito en la brecha entre la herramienta y la pieza de trabajo (por lo general de 0.1 a 0.6 mm) lava y elimina los iones metálicos de ésta (**ánodo**) antes de que tengan oportunidad de cubrir la herramienta (**cátodo**). Observe que la cavidad producida es la imagen complementaria de la forma de la herramienta.

La herramienta formada, ya sea en forma sólida o tubular, por lo general está hecha de latón, cobre, bronce o acero inoxidable. El electrolito es un fluido inorgánico que es muy buen conductor, como alguna solución acuosa de nitrato de sodio; se bombea por los pasajes de la herramienta a tasas de 10 a 16 m/s (3 a 50 pies/s). El suministro de una corriente eléctrica directa, en el rango de 10 a 25 V, mantiene las densidades de corriente, las cuales en la mayoría de las aplicaciones son de 20 a 200 A/cm² (130 a 1300 A/pulg²) de superficie maquinada activa.

La *tasa de remoción de material* (MRR, por sus siglas en inglés) en el maquinado electroquímico, para una eficiencia de corriente del 100%, se puede calcular con la ecuación

$$MRR = CI, \quad (27.1)$$

donde MRR se expresa en mm³/min, I es la corriente en amperes y C es una constante del material en unidades de mm³/A-min. Para metales puros, C depende de la valencia: cuanto más grande sea ésta, menor será el valor de C .

Existen máquinas que tienen capacidades de corriente tan altas como 40 000 A y tan bajas como 5 A. La tasa de penetración de la herramienta es proporcional a la densidad de corriente y la tasa de remoción de material por lo general está entre 1.5 y 4 mm³ por A-min. Debido a que la tasa de remoción de metal sólo es función de la tasa de intercambio de iones, no se ve afectada por la resistencia, dureza o tenacidad de la pieza de trabajo, característica que es común a los procesos descritos en este capítulo.

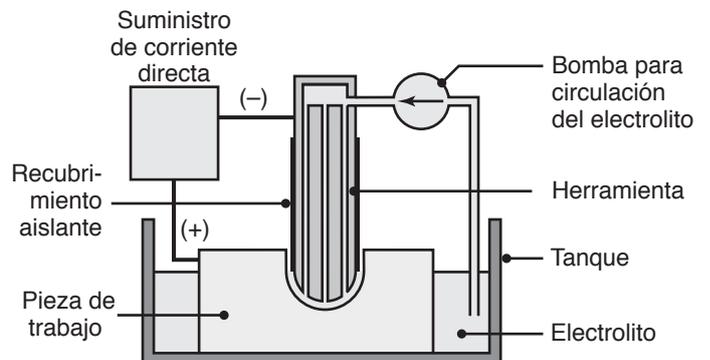


FIGURA 27.6 Ilustración esquemática del proceso de maquinado electroquímico.

Capacidades del proceso. El concepto básico del maquinado electroquímico se desarrolló con rapidez al inicio de la década de 1950, desde entonces se convirtió en un importante proceso de manufactura. Por lo general se usa para maquinar cavidades y formas complejas en materiales muy resistentes, en particular en la industria aeroespacial para la producción masiva de álabes de turbina, partes de motores de propulsión a chorro y boquillas (figura 27.7); otras aplicaciones incluyen las industrias automotriz (fundición de motores y engranes) y médica.

El maquinado electroquímico también se utiliza para maquinar y dar acabado en las cavidades de los dados de forja (trabajo conocido como *talla de dados*) y para producir barrenos pequeños. Ciertas modificaciones de este proceso se emplean para torneear, refrentar, fresar, ranurar, taladrar, trepanar y perfilar, así como en la producción de perfiles y mallas metálicas. Las aplicaciones más recientes del ECM incluyen el *micromaquinado* para la industria electrónica.

Un avance del ECM es el *maquinado electrolítico en forma de tubo* (STEM, por sus siglas en inglés); se utiliza para producir barrenos profundos de pequeño diámetro, como en los álabes de turbina (figura 27.8). El electrolito es de base ácido con el fin de garantizar que el metal desgastado se disuelva y lo elimine la solución. La herramienta es un tubo de titanio, para que resista la corrosión, recubierto con una resina aislante para restringir la acción electrolítica a la superficie frontal del electrodo. Es posible practicar barrenos tan pequeños como de 0.5 mm y a razones de profundidad a diámetro tan grandes como de 300:1; se pueden producir barrenos más grandes con *trepanación electrolítica*, como se ilustra en la figura 27.8b.

El proceso de maquinado electroquímico deja una superficie brillante y libre de rebabas, por lo que también puede usarse como una operación para eliminarlas. No ocasiona daño térmico a la parte y al no haber fuerzas en la herramienta se impide la distorsión, en especial en partes delgadas y flexibles. Además, no hay desgaste de la herramienta (ya que sólo se genera hidrógeno en el cátodo) y el proceso es capaz de producir formas complejas. Sin embargo, las propiedades mecánicas de los componentes elaborados con ECM deben compararse con cuidado con las de componentes obtenidos con otros

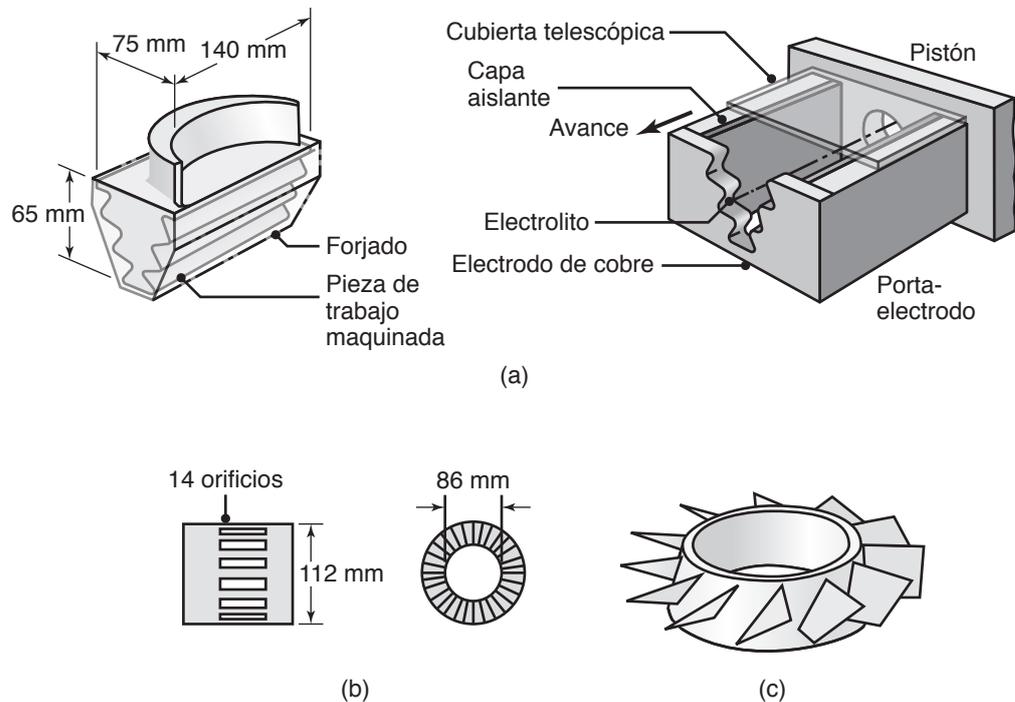


FIGURA 27.7 Partes normales elaboradas con maquinado electroquímico. (a) Álabes de turbina hecha con una aleación de 360 HB; note la forma del electrodo a la derecha. (b) Ranuras delgadas en una pista de acero 4340 para rodamientos. (c) Impulsores de aire en un disco compresor.

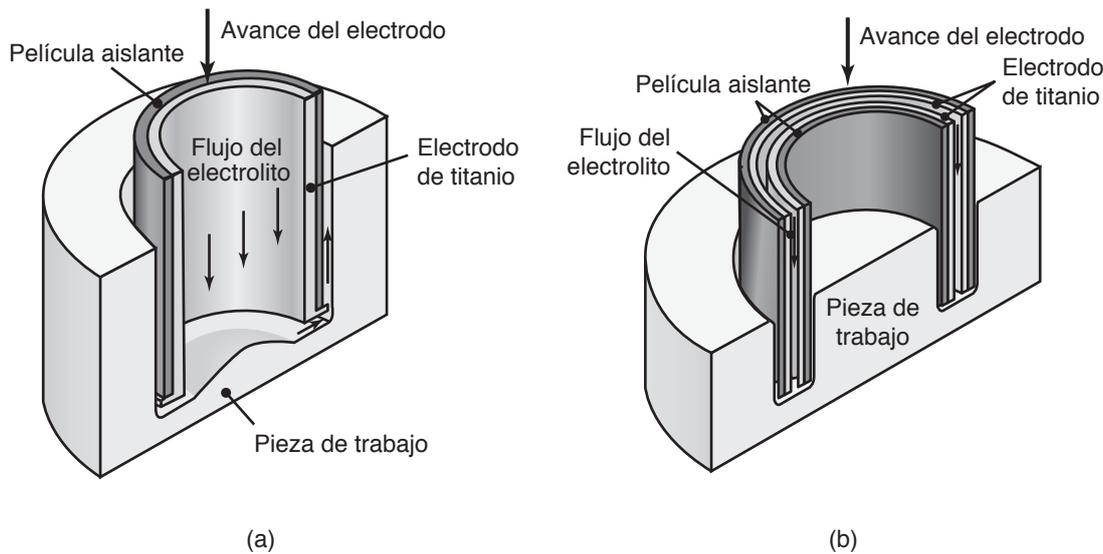


FIGURA 27.8 Operaciones de formado con maquinado electroquímico: (a) maquinado electroquímico en forma de tubo, usado para hacer barrenos pequeños con razones de longitud tan elevadas como 300:1; (b) trepanación electroquímica, utilizada para hacer barrenos de diámetro mayor.

procesos, con el fin de garantizar que no haya un compromiso significativo debido a las reacciones químicas.

Los sistemas de maquinado electroquímico ahora existen como *centros de maquinado de control numérico*, tienen capacidad de altas tasas de producción, mucha flexibilidad de operación y el mantenimiento de tolerancias dimensionales estrictas. El proceso del ECM también se combina con el maquinado por descarga eléctrica (EDM, por sus siglas en inglés) en la misma máquina (lo que se denomina **maquinado híbrido**; vea la sección 27.10).

Consideraciones de diseño para el maquinado electroquímico. Los siguientes son lineamientos de diseño para el maquinado electroquímico:

- El maquinado electroquímico no es apropiado para producir esquinas cuadradas agudas o fondos planos por la tendencia del electrolito a erosionar los perfiles afilados.
- Puede ser difícil controlar el flujo del electrolito, por lo que las cavidades irregulares no se podrían producir a la forma deseada y con una exactitud dimensional aceptable.
- Los diseños de la parte deben prever un pequeño ahusamiento para maquinar los barrenos y cavidades.

CASO DE ESTUDIO 27.1 Maquinado electroquímico de un implante biomédico

Un sistema de reemplazo total de la rodilla consiste en un implante del fémur y la tibia, combinado con un inserto de polietileno de peso molecular ultra alto (UHMWPE), como se aprecia en la figura 27.9a. El polietileno tiene una resistencia superior al desgaste y poca fricción contra el implante femoral de aleación

de cobalto-cromo. El inserto UHMWPE está moldeado por compresión (sección 19.7) y el implante de metal es un fundido y rectificado en sus superficies coincidentes externas.

Los diseñadores de implantes, ingenieros de manufactura y médicos han estado muy ocupados en par-

(continúa)

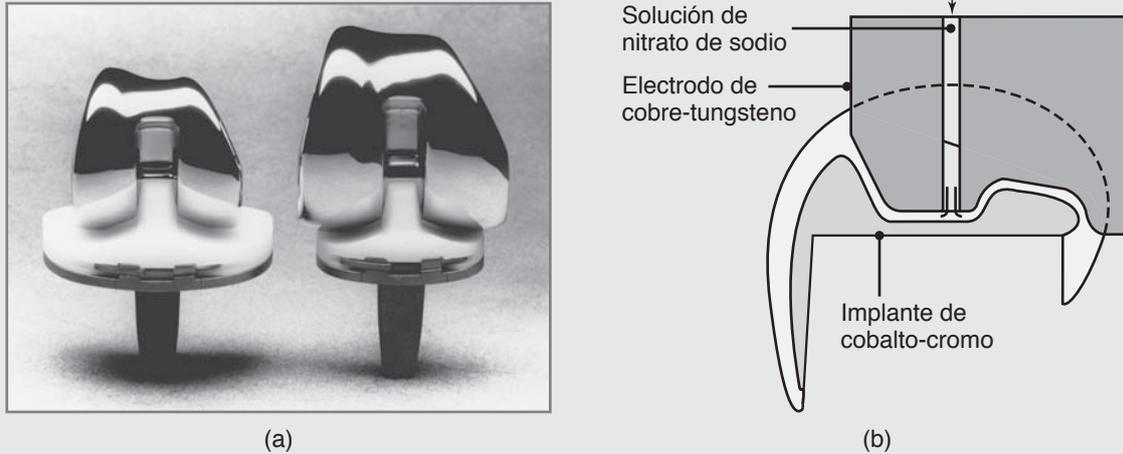


FIGURA 27.9 (a) Dos sistemas de reemplazo total de rodilla en los que se aprecian los implantes metálicos (piezas superiores) con insertos de polietileno de peso molecular ultra alto (piezas inferiores). (b) Sección transversal del proceso de ECM según se aplica al implante metálico. *Fuente:* Cortesía de Biomet, Inc.

ticular con la superficie de contacto en la cavidad del implante metálico que coincide con una protrusión en el inserto de polietileno. Como la rodilla se articula durante su movimiento normal, el polietileno se desliza contra la parte metálica, lo que potencialmente lo convierte en un sitio de desgaste muy grave (sección 33.5). Esta geometría es necesaria para garantizar la estabilidad lateral de la rodilla; es decir, para impedir que se tuerza hacia los lados.

Con el fin de producir una superficie suave, un procedimiento que se había seguido por muchos años era el rectificado de las superficies de deslizamiento del implante metálico con el empleo de rectificadoras manuales y montadas en una leva. Sin embargo, el rectificado producía poca calidad y era difícil de repetir. Las superficies interiores de esta parte son de acceso difícil en extremo para la piedra abrasiva y la aleación de cobalto-cromo es difícil de rectificar. En consecuencia, los procesos de maquinado avanzado, en particular el electroquímico, se consideraron candidatos ideales para realizar dicha operación.

Como se aprecia en la figura 27.9b, el procedimiento actual consiste en fijar el implante metálico en un soporte y llevar un electrodo de tungsteno del contorno final deseado a la proximidad del implante. El electrolito es una mezcla de nitrato de sodio y agua y se bombea a través de la herramienta para llenar el hueco entre ésta y el implante. Se aplica una fuente de energía (de 10 V y 225 A), lo que ocasiona el maquinado electroquímico local de las partes altas de la superficie del implante y se produce una superficie pulida.

Se puede controlar la tasa de flujo del electrolito con el fin de maximizar la calidad de la superficie. Cuando la tasa es demasiado baja aparecen defectos en la superficie maquinada, como hoyuelos localizados; si la tasa de flujo es demasiado alta los tiempos de maquinado se hacen más largos. Los tiempos normales de maquinado de esta parte son de cuatro a seis minutos.

Fuente: Cortesía de T. Hershberger y R. Redman, Biomet, Inc.

27.3.1 Maquinado electroquímico pulsado

El proceso de *maquinado electroquímico pulsado* (PECM, por sus siglas en inglés) es un refinamiento del maquinado electroquímico; usa densidades de corriente muy altas (del orden de 1 A/mm^2), pero la corriente es por *pulsos* en lugar de ser directa. El propósito de las pulsaciones es eliminar la necesidad de altas tasas de flujo del electrolito, lo que limita la utilidad del ECM en la manufactura de dados y moldes. Las investigaciones han demostrado que el PECM mejora la vida de fatiga en comparación con el ECM y el proceso no tiene la característica capa de refundición en las superficies de dados y moldes. Las tolerancias obtenidas por lo general están en el rango de 20 a $100 \mu\text{m}$.

Hoy día las máquinas realizan una combinación de EDM y de PECM, de ahí que se elimina la necesidad de mover la herramienta y la pieza de trabajo entre los dos procesos. Si estas operaciones ocurrieran en máquinas separadas sería difícil conservar la alineación precisa cuando la pieza se desplazara del EDM al PECM. Si hubiera una desalineación significativa, todo el pulido ocurriría donde el espacio sea más pequeño y la pasivación (vea la sección 3.8) sucederá donde sea más grande. Asimismo, el proceso dejará residuos de metal suspendidos en la solución acuosa, lo que resulta perjudicial para el ambiente si se elimina sin un tratamiento adecuado.

El proceso de ECM es eficaz para el *micromaquinado*. La total ausencia de desgaste de la herramienta implica que este proceso también se pueda utilizar para elaborar componentes electrónicos de precisión, aunque tiene que resolverse el problema de la erosión debido a la corriente resiente. Ahora, el maquinado electroquímico ha incrementado su flexibilidad por medio de la implementación de controles numéricos.

27.4 Rectificado electroquímico

El *rectificado electroquímico* (ECG, por sus siglas en inglés) combina el maquinado electroquímico con el rectificado convencional. El equipo que se utiliza es similar a una rectificadora convencional, excepto que la piedra es un *cátodo* rotatorio, con incrustaciones de partículas abrasivas (vea la figura 27.10a). La piedra es metal impregnado con abrasivos de diamante u óxido de aluminio y gira a una velocidad superficial de 1200 a 2000 m/min (4000 a 7000 pies/min).

Los abrasivos tienen dos funciones: (a) servir como aislantes entre la piedra y la pieza de trabajo y (b) remover mecánicamente los productos electrolíticos del área de trabajo. Se abastece un flujo de solución electrolítica, por lo general nitrato de sodio, para la fase de maquinado electroquímico de la operación. Las densidades de corriente van de 1 a 3 A/mm² (de 500 a 2000 A/pulg²). La mayor parte de la remoción del metal en el ECG es a través de la acción electrolítica, y por lo general menos de 5% del metal se retira por la acción abrasiva de la piedra; por lo anterior, el desgaste de ésta es muy poco y la pieza de trabajo permanece fría. Por lo general los cortes del acabado se realizan por la acción de rectificado, pero sólo para producir una superficie con buen acabado y exactitud dimensional.

El proceso de ECG es adecuado para aplicaciones similares a aquellas en que se usa fresado, rectificado y aserrado (figura 27.10b), pero no es adaptable a las operaciones de formación de cavidades. El ECG, que se aplica con éxito a carburos y aleaciones de alta resistencia, ofrece una ventaja distinta sobre el rectificado con piedra de diamante tradicional de materiales muy duros, donde el desgaste de la piedra llega a ser grande. Existen máquinas de ECG con control numérico que mejoran la exactitud dimensional y la repetibilidad e incrementan la productividad.

El *asentado electroquímico* combina la acción abrasiva fina del asentado (sección 26.7) con la acción electroquímica. Aunque el equipo es costoso, este proceso es hasta 5 veces más rápido que el asentado convencional, y la herramienta dura hasta 10 veces más. El asentado electroquímico se utiliza sobre todo para dar acabado a las superficies cilíndricas internas.

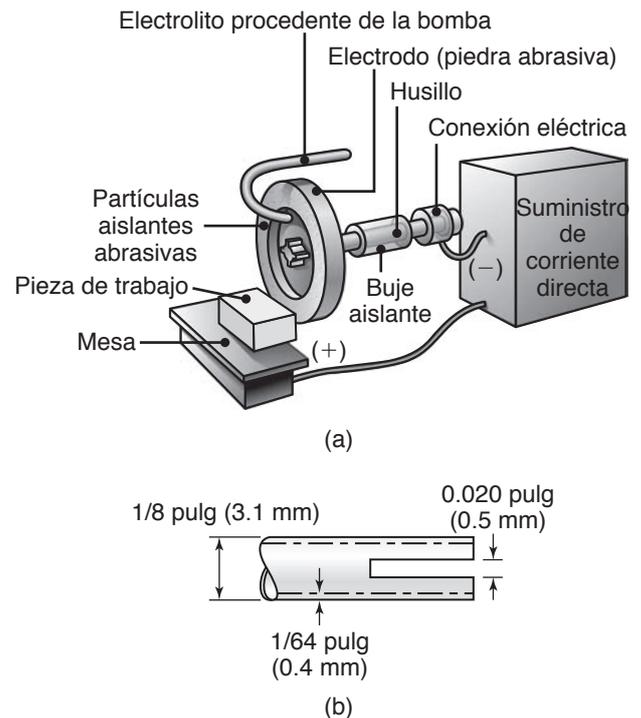


FIGURA 27.10 (a) Ilustración esquemática del proceso de rectificado electroquímico. (b) Ranura delgada producida con este proceso en un tubo redondo de aleación de níquel (Inconel).

Consideraciones de diseño para el rectificado electroquímico. Además de las consideraciones de diseño ya listadas para el maquinado electroquímico, el rectificado electroquímico requiere dos más:

- El diseño debe evitar radios internos agudos.
- Si una superficie ha de ser plana, debe ser más angosta que el ancho de la piedra abrasiva.

27.5 Electroerosión

El principio de la *electroerosión* o *maquinado por descarga eléctrica* (EDM, por sus siglas en inglés), también llamado *electrodescarga* o *maquinado por chispas*, se basa en la erosión de metales por medio de chispas de descargas eléctricas. Recuerde que cuando dos conductores de corriente se tocan se produce un arco eléctrico. Al examinar de cerca el punto de contacto entre los dos conductores, se observará que una porción pequeña de metal ha quedado erosionada, lo que deja un pequeño cráter en la superficie. Aunque este fenómeno se ha conocido desde el descubrimiento de la electricidad, sólo hasta antes de la década de 1940 se desarrolló un proceso de maquinado con base en ese principio; el EDM se ha convertido en una de las tecnologías de producción más importantes y de mayor uso en la manufactura.

Principio de operación. El sistema básico del maquinado por descarga eléctrica consiste en una herramienta de forma (*electrodo*) y la pieza de trabajo conectada a una fuente de corriente directa y situada en un fluido dieléctrico (un no conductor de electricidad), como se aprecia en la figura 27.11a. Cuando la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza de trabajo es suficientemente alta, se rompe la resistencia del dieléctrico y se descarga una chispa momentánea a través del fluido, lo que remueve una cantidad muy pequeña de metal de la superficie de la pieza de trabajo. La descarga del condensador se repite de manera continua a razón de entre 200 y 500 kHz, con voltajes en el rango general de 50 a 380 V y corrientes de 0.1 a 500 A. El volumen de material removido por descarga es común que esté en el rango de 10^{-6} a 10^{-4} mm³ (10^{-10} a 10^{-8} pulg³).

El proceso de EDM puede usarse en cualquier material que sea conductor de electricidad. Dos propiedades importantes, que determinan el volumen del metal removido por descarga, son el punto de fusión y el calor latente de fusión del material de la pieza de trabajo. A medida que estas cantidades se incrementan, disminuye la tasa de material removido. La tasa de remoción de material se estima con la fórmula empírica siguiente:

$$\text{MRR} = 4 \times 10^4 I T_w^{-1.23}, \quad (27.2)$$

donde la MRR está expresada en mm³/min, I es la corriente en amperes y T_w es el punto de fusión de la pieza de trabajo en °C.

La pieza de trabajo se fija dentro del tanque que contiene el fluido dieléctrico y sus movimientos se efectúan con sistemas de control numérico. El espacio entre la herramienta y la pieza de trabajo (*sobrecorte*) es crítico; de este modo, el avance de la herramienta hacia abajo está controlado por un servomecanismo, el cual mantiene en forma automática un espacio constante. Por lo general, la frecuencia de la descarga o la energía por descarga, el voltaje y la corriente, se hacen variar para controlar la tasa de remoción. La tasa y rugosidad de la superficie producida aumentan con el incremento de la densidad de corriente y con la disminución de la frecuencia de las chispas.

Fluidos dieléctricos. Las funciones del fluido dieléctrico son:

1. Actuar como un aislante hasta que el potencial es suficientemente alto.
2. Brindar un medio de enfriamiento.
3. Actuar como un medio de flujo y retirar los residuos del espacio.

Las máquinas de maquinado por descarga eléctrica están equipadas con una bomba y sistema de filtrado para el fluido dieléctrico. Los fluidos dieléctricos más comunes son aceites minerales, aunque en aplicaciones especiales también se emplean keroseno y agua

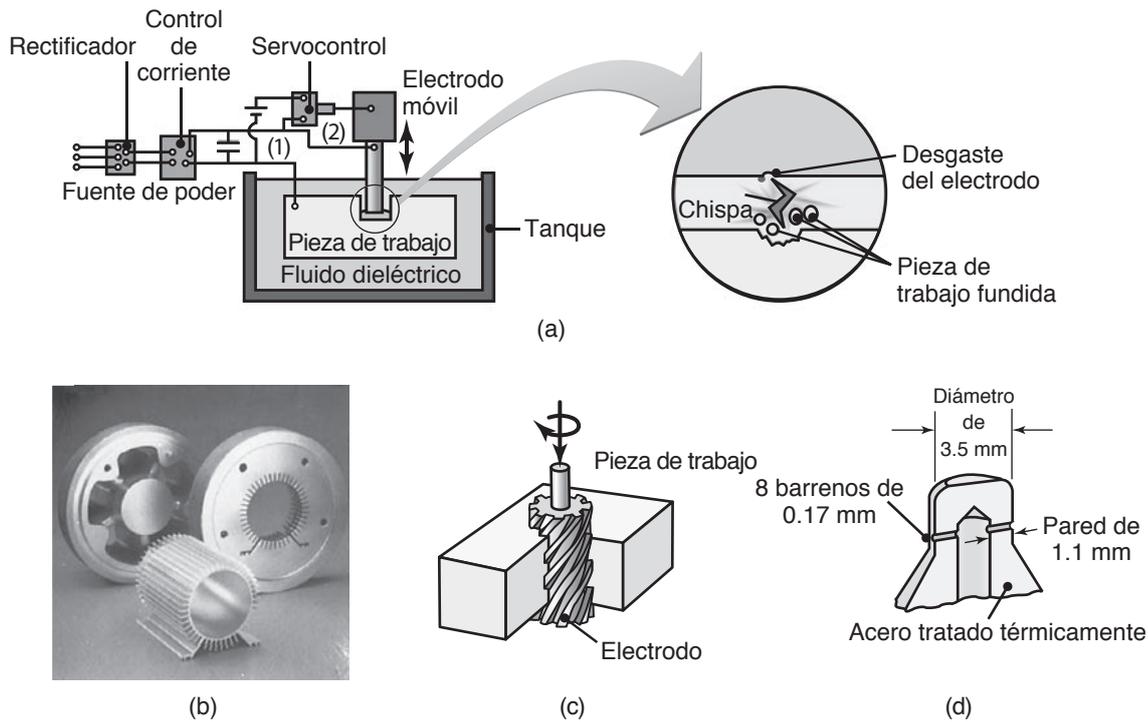


FIGURA 27.11 (a) Ilustración esquemática del proceso de maquinado por descarga eléctrica; éste es uno de los más utilizados, en particular para aplicaciones de tallado de dados. (b) Ejemplos de cavidades producidas por EDM con el uso de electrodos con forma; las dos partes redondas (atrás) son el conjunto de dados usados en la extrusión de la pieza de aluminio que se muestra en el frente (vea también la figura 15.9b). (c) Cavidad espiral producida por EDM con el empleo de un electrodo que gira con lentitud parecido a un tornillo con rosca. (d) Barrenos en una boquilla para inyección de combustible manufacturada con EDM; el material es acero tratado térmicamente. Fuente: (b) Cortesía de AGIE USA, Ltd.

destilada o sin iones. Aunque son más caros, también existen fluidos de baja viscosidad y claros que hacen más fácil la limpieza.

Electrodos. Los electrodos para el EDM suelen estar hechos de grafito, aunque también se emplean latón, cobre o aleaciones de cobre-tungsteno. Las herramientas reciben su forma por formado, fundición, metalurgia de polvos o técnicas de maquinado CNC. Los electrodos conductores de tungsteno son tan pequeños que tienen un diámetro de 0.1 mm (0.005 pulg) y se utilizan para producir barrenos, con razones de profundidad a diámetro de hasta 400:1, que es mucho mayor que la que se obtiene con métodos convencionales (vea la tabla 23.10).

En el maquinado por descarga eléctrica las chispas también erosionan al electrodo, lo que cambia su geometría y perjudica la forma producida y su exactitud dimensional. La *razón de desgaste* se define como la razón del volumen del material removido de la pieza de trabajo al volumen del desgaste de la herramienta; está en un rango alrededor de 3:1 para electrodos metálicos y hasta de 100:1 para electrodos de grafito. Se ha demostrado que el desgaste de la herramienta se relaciona con los puntos de fusión de los materiales involucrados: cuanto más alto sea el punto de fusión del electrodo, más baja será la tasa de desgaste. En consecuencia, los electrodos de grafito tienen la mayor resistencia al desgaste; asimismo, a mayor intensidad de corriente, mayor desgaste. El desgaste de la herramienta se puede minimizar al invertir la polaridad y emplear herramientas de cobre, en un proceso llamado **EDM sin desgaste**. Debe tenerse cuidado en el control del proceso; es posible que el material de la pieza de trabajo recubra el electrodo y cambie su forma.

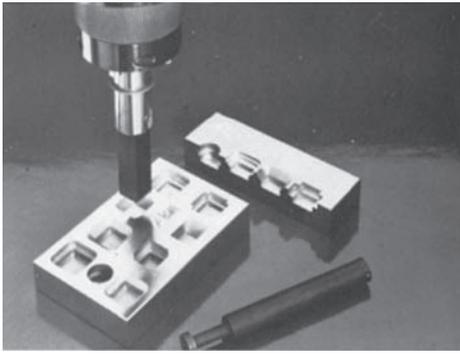


FIGURA 27.12 Cavidades escalonadas producidas con un electrodo cuadrado con el proceso de EDM. La pieza de trabajo se mueve en las dos principales direcciones horizontales, su movimiento está sincronizado con el movimiento hacia abajo del electrodo para producir las cavidades; también se muestra un electrodo redondo capaz de producir cavidades esféricas o elípticas. Fuente: Cortesía de AGIE USA, Ltd.

Capacidades del proceso. El maquinado por descarga eléctrica tiene numerosas aplicaciones, por ejemplo dados para forja, extrusión, dados para fundición, moldeo por inyección y componentes de grandes láminas metálicas de la carrocería de automóviles (producidas en centros de maquinado de dados, de control numérico). Otras aplicaciones incluyen el maquinado de barrenos de pequeño diámetro pero profundos, que usan un conductor de tungsteno como electrodo; ranuras angostas en ciertas partes; conductos de refrigeración en los álabes de turbina hechos con superaleaciones y varias formas intrincadas (vea las figuras 27.11b y c). Pueden producirse cavidades escalonadas simplemente controlando los movimientos relativos de la pieza de trabajo en relación con el electrodo (figura 27.12).

Maquinado con arco azul. Una variación del maquinado por descarga eléctrica es el proceso con *arco azul* desarrollado para hacer cortes rugosos en materiales difíciles de maquinar, en especial superaleaciones de níquel. La geometría de los discos de álabes (o *blisks*) que se usan en los motores de avión es un reto para el maquinado; el proceso de arco azul remueve la mayor parte del material para lograr la forma básica, que después se termina por medio de maquinarla en una fresa CNC convencional. El arco azul usa un electrodo y una descarga eléctrica para maquinar y remover el material, pero agrega un fluido a alta presión que retira las virutas de la zona de corte. Se ha demostrado que este método reduce

hasta 30% el consumo de energía en comparación con el fresado, además disminuye de días a horas el ciclo de tiempo para producir los discos con aspas. Existen variantes del maquinado con arco azul para el torneado y el rectificado.

Debido a la superficie fundida y vuelta a solidificar (refundido) que se desarrolla, grandes tasas de material removido producen una superficie con acabado muy rugoso, con mala integridad y propiedades de fatiga deficientes. Los cortes de acabado se hacen entonces a tasas de remoción lentas, o bien la capa del refundido se retira posteriormente por operaciones de acabado. También se ha demostrado que el acabado de la superficie mejora si se hace *oscilar* el electrodo con un movimiento planetario, con amplitudes de 10 a 100 μm .

Consideraciones de diseño para el EDM. Los lineamientos generales de diseño para el maquinado por descarga eléctrica son los siguientes:

- Las partes deben diseñarse de modo que los electrodos requeridos reciban su forma sin grandes costos.
- Deben evitarse las ranuras profundas y las aberturas angostas.
- Para lograr una producción rentable, el acabado que se especifique para la superficie no debe ser demasiado fino.
- Con el fin de lograr una tasa de producción elevada, el grueso de la remoción de material debe realizarse con procesos convencionales (llamado *corte de desbaste*).

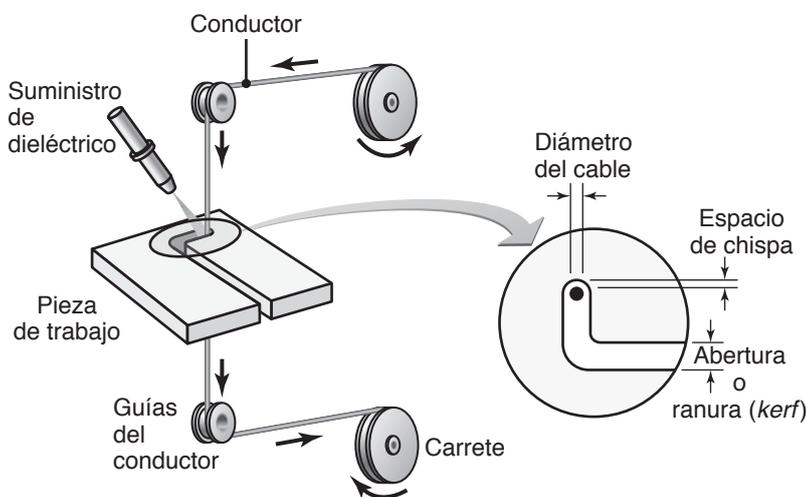


FIGURA 27.13 Ilustración esquemática del proceso EDM; pueden realizarse hasta 50 horas de maquinado con un carrete de conductor, el cual luego se recicla o desecha.

27.5.1 Maquinado por descarga eléctrica con alambre

Una variación del EDM es el *EDM con alambre*, o *electroerosión de hilo* (figura 27.13). Este proceso es parecido al corte de contorno que se hace con una sierra de cinta (ilustrado en la figura 24.28), en el cual un cable que se

mueve con lentitud recorre una trayectoria prescrita y corta la pieza de trabajo. La figura 27.14a muestra una placa gruesa que se corta con este proceso, en una máquina semejante a la de la figura 27.14b. De esta manera es posible cortar placas de un grosor de hasta 300 mm (12 pulg) y punzones, herramientas y dados hechos de metales duros, así como componentes intrincados para la industria electrónica.

El alambre se mueve a una velocidad constante en el rango de 0.15 a 9 m/min (6 a 360 pulg/min), y durante el corte se mantiene un espacio constante (*abertura* o *kerf*). Por lo general, la velocidad de corte se da con respecto al área de la sección transversal cortada por unidad de tiempo. Ejemplos comunes son 32 000 mm²/h (50 pulg²/h) para un acero D2 de 50 mm (2 pulg) de grueso para herramienta, y 80 000 mm²/h (125 pulg²/h) para aluminio de 150 mm (6 pulg) de grueso. Estas tasas de remoción indican una velocidad de corte lineal de 32 000/50 = 640 mm/h = 10.7 mm/min, y 80 000/150 = 533 mm/h = 8.9 mm/min, respectivamente.

El alambre suele estar hecho de latón, cobre, tungsteno o molibdeno; también se usan alambres con recubrimientos de zinc o latón, recubrimientos múltiples y núcleos de acero. El diámetro del alambre por lo general es de alrededor de 0.30 mm (0.012 pulg) para cortes de desbaste y de 0.20 mm (0.008 pulg) para cortes de acabado. El alambre debe tener una conductividad eléctrica elevada y resistencia a la tensión, ya que es común que alcance 60% de su resistencia a la tensión. Por lo general se usa una sola vez y es relativamente barato en comparación con el tipo de operación que realiza.

Los centros de maquinado de EDM con alambre cortador de ejes múltiples son capaces de producir formas tridimensionales y están equipados con herramientas como las siguientes:

- Controles por computadora, para dirigir la trayectoria de corte del alambre (figura 27.14b) y su ángulo con respecto al plano de la pieza de trabajo.
- Cabezas múltiples para cortar dos partes al mismo tiempo.
- Características como controles para prevenir la ruptura del alambre.
- Propiedades como enrollado automático en caso de ruptura del alambre.
- Estrategias de maquinado programado, con el fin de optimizar la operación.

Las máquinas de dos ejes controladas por computadora tienen la capacidad de producir formas cilíndricas, de manera parecida a una operación de torneado o rectificado cilíndrico. Las máquinas modernas de maquinado por descarga eléctrica con alambre permiten controlar el avance y tomar los extremos del alambre para cruzar de manera independiente en dos direcciones principales, de modo que también pueden manufacturarse partes con ahusamientos.

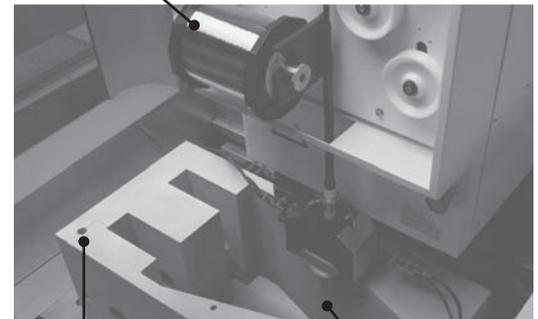
27.5.2 Rectificado por electroerosión

En el *rectificado por electroerosión* (EDG, por sus siglas en inglés), la piedra abrasiva está hecha de grafito o latón y no contiene abrasivos. El material se remueve de la superficie de la pieza de trabajo por medio de descargas de chispas entre ésta y la piedra. Este proceso se utiliza sobre todo para rectificar herramientas y dados de carburo, pero también puede emplearse con partes frágiles como agujas quirúrgicas, tubos de pared delgada y estructuras tipo panel.

El material es removido por acción química, con las descargas eléctricas de la piedra de grafito que rompen la película de óxido de la pieza de trabajo, y ésta se lava con el flujo del electrolito. La tasa de remoción de material se estima con la ecuación

$$MRR = KI, \quad (27.3)$$

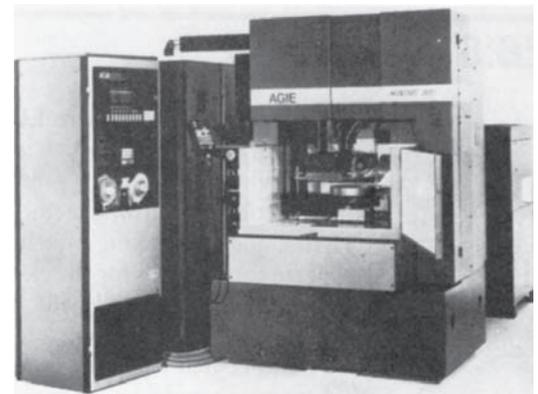
Carrete de alambre



Pieza de trabajo

Alambre

(a)



(b)

FIGURA 27.14 (a) Corte de una placa gruesa con EDM con alambre. (b) Máquina de EDM con alambre controlada por computadora. Fuente: Cortesía de AGIE USA, Ltd.

donde la MRR está expresada en mm^3/min , I es la corriente en amperes y K es un factor del material de la pieza de trabajo expresado en $\text{mm}^3/\text{A}\cdot\text{min}$. Por ejemplo, $K = 4$ para carburo de tungsteno y $K = 16$ para acero.

En el **aserrado EDM** se utiliza un arreglo similar a una banda o cierra circular (pero sin dientes), con el mismo circuito eléctrico que para el EDM. Se pueden hacer cortes angostos con tasas elevadas de remoción de metal. Debido a que las fuerzas de corte se pueden obviar, el proceso también se puede utilizar en componentes delgados y esbeltos.

Es posible combinar el proceso de rectificado por electroerosión con rectificado electroquímico. El proceso recibe el nombre de **rectificado por descarga electroquímica** (ECDG, por sus siglas en inglés) y usa una piedra de grafito, una descarga intermitente de la chispa, de corriente alterna o un pulso de corriente directa, produce la remoción del material. El ECDC también es común que use un electrolito de mucha conductividad en lugar de un fluido dieléctrico y emplea voltajes menores. Este proceso es más rápido que el EDG, pero su consumo de energía es más alto.

27.6 Maquinado con rayo láser

En el *maquinado con rayo láser* (LBM, por sus siglas en inglés), la fuente de energía es un **láser** (acrónimo de *luz amplificada por emisión estimulada de radiación*) que enfoca energía óptica sobre la superficie de la pieza de trabajo (figura 27.15a). La fuente de energía de alta densidad y muy concentrada funde el metal y evapora porciones de la pieza de trabajo en una forma controlada. Este proceso, que no requiere un vacío, se utiliza para maquinar varios materiales metálicos y no metálicos.

En las operaciones de manufactura se emplean varios tipos de láseres (tabla 27.2):

1. CO_2 (*onda en pulsos o continua*).
2. Nd:YAG (neodimio: itrio-aluminio-granate).
3. Nd: vidrio, rubí.
4. Diodo.
5. Excímero [de las palabras *excitado* y *dímero*, que se entiende como dos meros (como en polímero), o dos moléculas de la misma composición química (dos átomos o moléculas unidos a sus electrones en un solo nivel excitado de energía)].

En el maquinado con rayo láser dos parámetros importantes son lo *reflejante* y la *conductividad térmica* de la superficie de la pieza de trabajo, así como su calor específico y

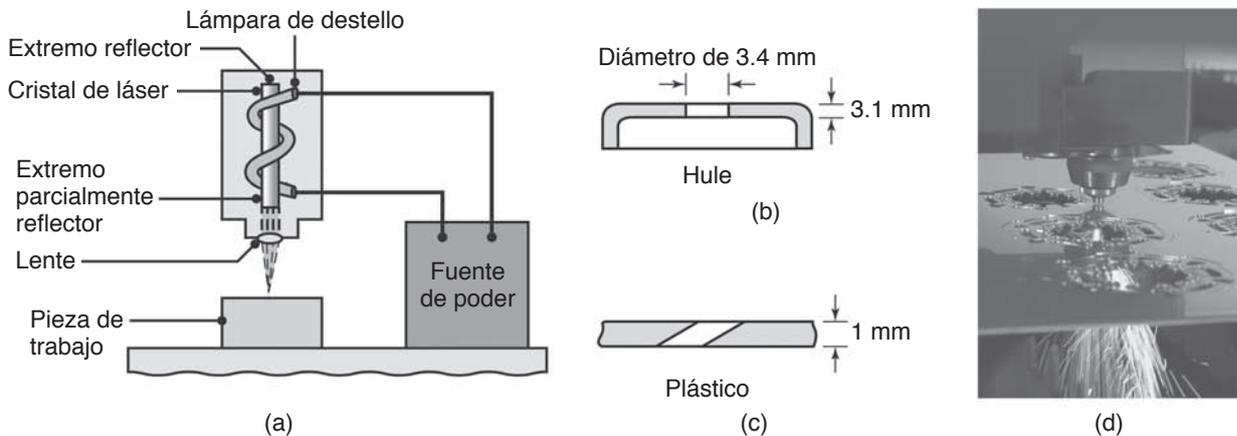


FIGURA 27.15 (a) Ilustración esquemática del proceso de maquinado con rayo láser. (b) y (c) ejemplos de perforaciones producidas en partes no metálicas con LBM. (d) Corte de una placa metálica con rayo láser. Fuente: (d) Cortesía de Rofin-Sinar, Inc.

calores latentes de fusión y evaporación; cuanto más bajas sean esas cantidades, más eficiente es el proceso. La profundidad de corte se expresa como

$$t = \frac{CP}{vd} \quad (27.4)$$

donde t es la profundidad, C es una constante del proceso, P es el suministro de potencia, v es la velocidad de corte y d es el diámetro de la fuente del láser. Las densidades pico de energía de los rayos láser están en el rango de 5 a 200 kW/mm².

La superficie producida por el LBM suele ser rugosa y tiene una *zona afectada por calor* (como se describe en la sección 30.9), la cual, en aplicaciones críticas, tiene que eliminarse o tratarse térmicamente. El ancho de abertura o corte (*kerf*) es una consideración importante, igual que en otros procesos de corte, como el aserrado, el EDM con alambre y el maquinado con haz de electrones. En general, cuanto más pequeño sea el ancho de abertura mayor será la exactitud y la utilización de material, así como menor la zona afectada por calor.

Los rayos láser se pueden usar en combinación con una corriente de gas (como el oxígeno), llamado *soplete de rayo láser*, para aumentar la absorción de energía para cortar placas metálicas. El *corte asistido con láser de alta presión*, o de *gas inerte* (nitrógeno o argón), se utiliza para el acero inoxidable y el aluminio; deja un borde libre de óxido que puede mejorar la capacidad de soldar estos metales. Las corrientes de gas también tienen la importante función de retirar de la superficie de la pieza de trabajo el material fundido y vaporizado.

Capacidades del proceso. Hoy día se usa mucho el maquinado con rayo láser para practicar perforaciones, trepanar y cortar metales, materiales no metálicos, cerámicos y materiales compósitos (figuras 27.15b y c). La limpieza de la operación ha hecho del maquinado con rayo láser una alternativa más atractiva que los métodos de maquinado tradicionales. Se han hecho barrenos tan pequeños como de 0.005 mm (0.0002 pulg) con razones de profundidad a diámetro de 50:1, en diferentes materiales, aunque un mínimo más práctico es de 0.025 mm (0.001 pulg). Es posible cortar placas de acero de 32 mm (1.25 pulg) con rayos láser.

Con el maquinado con rayos láser se tienen ahorros significativos en el costo y el proceso es competitivo con el maquinado por descarga eléctrica. Se utiliza cada vez más en las industrias electrónica y automotriz y para materiales compósitos. Dos ejemplos de maquinado con rayo láser son: los ductos de enfriamiento en ciertos álabes de los motores del Boeing 747 y las perforaciones para purgar las cubiertas de bombas de combustible, así como los conductos de lubricación en las cajas de transmisión. Los láseres también se utilizan en las aplicaciones siguientes:

- **Soldadura** (sección 30.7).
- **Tratamiento térmico** de metales y cerámicos a pequeña escala y en sitios localizados, con el fin de modificar las propiedades mecánicas y tribológicas de su superficie.
- **Marcado** de partes, como letras, números y códigos; observe que el marcado también puede hacerse por medio de (a) punzones, alfileres, puntas y balines; (b) estampado y (c) grabado; aunque el equipo es más caro que el utilizado en otros métodos, el marcado y grabado con láser se ha vuelto cada vez más común debido a su exactitud, facilidad de reproducción, flexibilidad, facilidad de automatización y aplicación en línea en la manufactura.

La *flexibilidad* inherente al proceso de corte con láser, inclusive su transmisión con *rayo en fibra óptica*, simplicidad del arreglo y tiempos cortos de preparación, así

TABLA 27.2**Aplicaciones generales de los láseres en la manufactura**

Aplicación	Tipo de láser
Corte	
Metales	PCO ₂ , CWCO ₂ , Nd:YAG, rubí
Plásticos	CWCO ₂
Cerámicos	PCO ₂
Taladrado	
Metales	PCO ₂ , Nd:YAG, Nd:vidrio, rubí
Plásticos	Excímero
Marcado	
Metales	PCO ₂ , Nd:YAG
Plásticos	Excímero
Cerámicos	Excímero
Tratamiento de superficies	CWCO ₂
Soldadura	
Metales	PCO ₂ , CWCO ₂ , Nd:YAG, Nd:vidrio, rubí, diodo
Plásticos	Diodo, Nd:YAG
Litografía	Excímero

Nota: P = Pulso, CW = Onda continua, Nd:YAG = Neodimio: itrio-aluminio-granate.

como la disponibilidad de máquinas de múltiples kW y sistemas robotizados de corte con láser, controlados por computadora y en dos y tres dimensiones, hacen de este proceso una herramienta competitiva y atractiva. Por ejemplo, el corte con láser de láminas puede sustituir con éxito los procesos de perforación tradicionales con punzón descritos en el capítulo 16. Los rayos láser también se combinan con otros procesos para mejorar la eficiencia conjunta, como se describe en la sección 27.10 y se muestra en el ejemplo 27.1.

Consideraciones de diseño para el LBM. Los lineamientos generales del diseño para el maquinado con rayo láser son los siguientes:

- Deben evitarse las esquinas agudas, ya que son difíciles de producir.
- Los cortes profundos producirán paredes con ahusamientos.
- Son preferibles las superficies opacas y sin pulir.
- Puede haber efectos perjudiciales en las propiedades de los materiales maquinados, ocasionados por las altas temperaturas locales y la zona afectada por el calor.

EJEMPLO 27.1 Combinación de corte con rayo láser y punzonado de una placa de metal

Los procesos de corte con láser y perforado con punzón tienen sus respectivas ventajas y limitaciones en cuanto a los aspectos técnico y económico (vea *maquinado híbrido*, sección 27.10). Las ventajas del *corte con rayo láser* por lo general son (a) la flexibilidad de la operación, debido a que no se necesitan herramientas duras y no hay limitaciones para el tamaño de la parte, (b) amplio rango del espesor del material, (c) capacidad de hacer prototipos, pues los tamaños del lote pueden ser hasta de un solo artículo, (d) materiales y compuestos que de otro modo se cortarían con dificultad y (e) geometrías complejas que se pueden programar fácilmente.

Los inconvenientes y desventajas del *perforado con punzón* incluyen (a) los grandes tamaños del lote para que se justifique la rentabilidad de comprar las herramientas y el equipo, (b) formas relativamente sencillas, (c) rango pequeño del espesor de la parte, (d) geometrías fijas y limitadas de la perforación, incluso con el empleo de torretas, y (e) alta tasa de producción.

Es evidente que los dos procesos cubren rangos diferentes pero complementarios. No es difícil visualizar partes con algunos rasgos que se pueden producir mejor con un proceso y otros que se producirían mejor con el proceso alterno.

Se han diseñado y construido máquinas de forma tal que los procesos y accesorios se pueden utilizar de manera conjunta en todas sus posibilidades, sin que interfieran con las fronteras operacionales de las demás. El propósito de combinarlas es incrementar la eficiencia conjunta y la productividad del proceso de manufactura, para partes que están dentro de las capacidades de cada uno de los dos procesos, semejante al concepto de los centros de maquinado descritos en la sección 25.2. Por ejemplo, las prensas de punzón con torreta se han equipado con un cabezal láser integrado; la máquina puede perforar o cortar con láser, pero no hacer las dos cosas al mismo tiempo.

Son varios los factores que deben tomarse en cuenta en una combinación de dos procesos con respecto a las características de cada operación: (a) los rangos de tamaños, espesores y formas que se han de producir, y cómo se habrán de anidar; (b) los tiempos de procesamiento y preparación, inclusive la carga, sujeción y descarga de las partes; (c) la programación para el corte y (d) las capacidades del proceso de cada método, inclusive la dinámica del sistema, vibraciones e impactos debidos a la perforación con punzón y que pueden alterar los ajustes y alineación de los componentes del láser.

Láser Microjet. El láser Microjet[®], que se ilustra en la figura 27.16, utiliza un chorro de agua laminar de baja presión que sirve como un cable de fibra óptica de longitud variable para dirigir el láser y llevar su energía al fondo de la abertura del corte (kerf). Esto tiene la ventaja de que la profundidad del enfoque del láser es muy grande y se pueden producir razones de aspecto elevadas. El chorro de agua lo produce una boquilla de zafiro o diamante con abertura de 25 a 100 μm , y ejerce una fuerza menor que 0.1 N. En el maquinado con láser Microjet, la remoción del material se debe a la acción del láser, el agua proporciona enfriamiento (al reducir la zona afectada por el calor; vea la sección 30.9) e impide que las salpicaduras de soldadura alcancen la pieza de trabajo. Es común

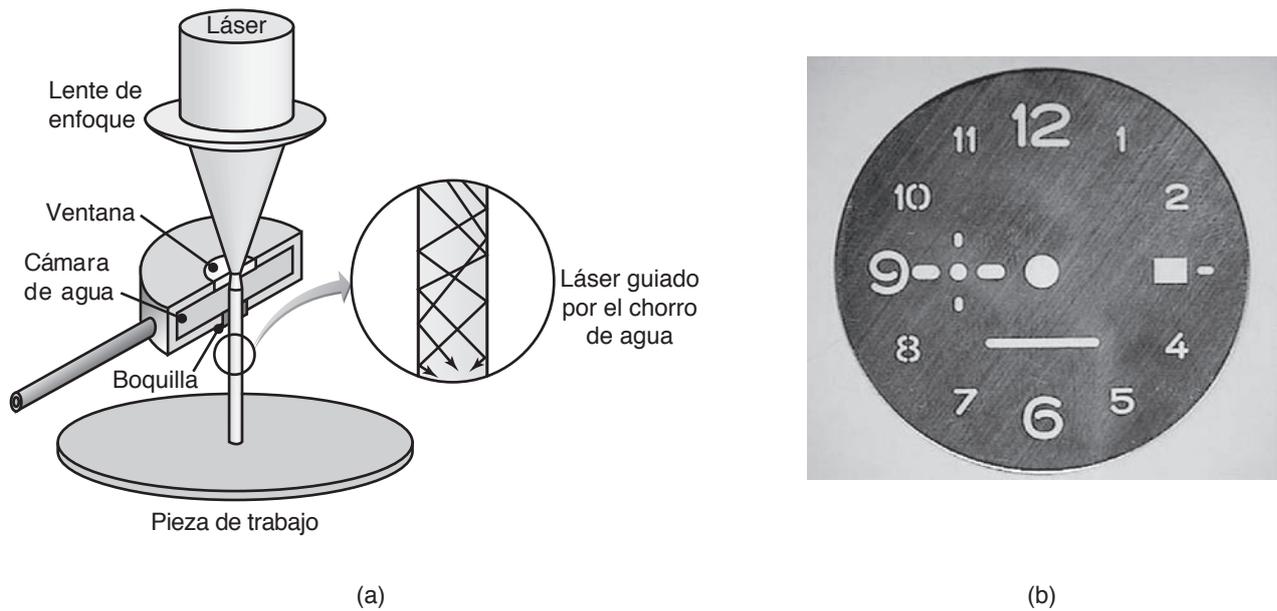


FIGURA 27.16 (a) Ilustración esquemática del proceso del láser Microjet. (b) Carátula de 25 mm de diámetro producida a partir de una placa de latón por medio de maquinado Microjet. Fuente: (b) Cortesía de Synova S. A.

que el láser sea un ND:Yag, con duración del pulso en el rango de los microsegundos o nanosegundos y una potencia de entre 10 y 200 W.

27.7 Maquinado con haz de electrones

La fuente de energía en el *maquinado con haz de electrones* (EBM, por sus siglas en inglés) son electrones de alta velocidad que golpean la superficie de la pieza de trabajo y generan calor (figura 27.17). Las máquinas utilizan voltajes en el rango de 150 a 200 kV para acelerar los electrones a entre 50 y 80% de la velocidad de la luz (300 000 km/s). Las aplicaciones de este proceso son similares a las del maquinado con rayo láser, sólo que, a diferencia de los láseres, el EBM requiere de un *vacío*; en consecuencia, se utiliza con mucha menor frecuencia que el maquinado con rayo láser.

El maquinado con haz de electrones se utiliza para hacer cortes muy exactos de una amplia variedad de metales, el acabado de la superficie es mejor y la abertura es más angosta que en otros procesos térmicos de corte (vea también la sección 30.6 acerca de la *soldadura con haz de electrones*). Sin embargo, la interacción del haz de electrones con la superficie de la pieza de trabajo produce rayos X peligrosos, por lo que el equipo sólo debe ser empleado por personal altamente calificado.

Consideraciones de diseño para el EBM. Los lineamientos del maquinado con haz de electrones por lo general son similares a los del maquinado con rayo láser; otras consideraciones son las siguientes:

- Debido a que las cámaras de vacío tienen capacidad limitada, las partes individuales o los lotes deben coincidir estrechamente con el tamaño de la cámara de vacío.
- Si una parte requiere de maquinado con haz de electrones en sólo una pequeña porción de su volumen, debe manufacturarse como varios componentes más pequeños para ensamblarlos una vez maquinados con el haz de electrones.

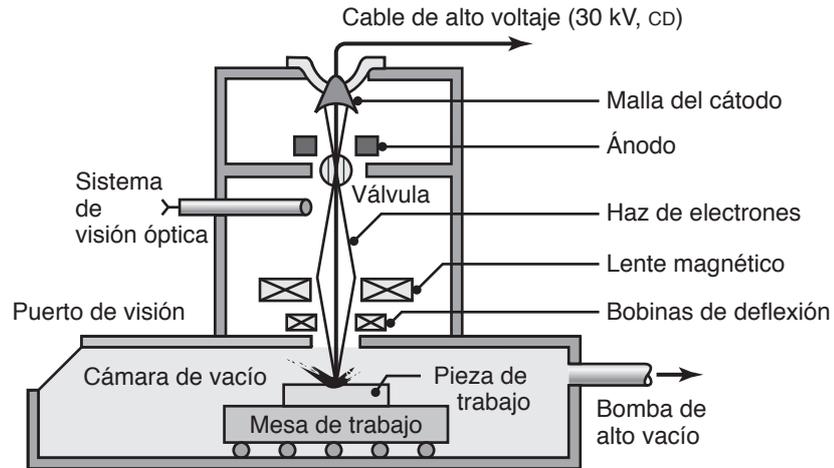


FIGURA 27.17 Ilustración esquemática del proceso de maquinado con haz de electrones; a diferencia del LBM, el EBM requiere vacío, por lo que el tamaño de la pieza de trabajo está limitado al tamaño de la cámara de vacío.

Corte con arco de plasma. En el corte con *arco de plasma* (PAC, por sus siglas en inglés), se usan rayos de plasma (gas ionizado) para cortar con rapidez láminas y placas ferrosas y no ferrosas (vea también la sección 30.3). Las temperaturas generadas son muy elevadas en el soplete, del orden de $9400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($17\ 000\text{ }^{\circ}\text{F}$) cuando se usa oxígeno como gas para el plasma, de manera que las tasas de remoción de material son mucho mayores que las asociadas a los procesos de EDM y LBM. El proceso es rápido, el ancho de la abertura es pequeño, las partes se maquinan de modo que es fácil reproducirlas y el acabado de la superficie es bueno; se pueden cortar partes tan gruesas como de 150 mm (6 pulg). Actualmente el corte con arco de plasma está muy automatizado, pues usa controladores programables.

27.8 Maquinado con chorro de agua

El principio de *maquinado con chorro de agua* (WJM, por sus siglas en inglés), también llamado maquinado hidrodinámico, se basa en la fuerza que resulta del cambio de momento de una corriente de agua. Esta fuerza es lo bastante grande como para cortar materiales metálicos y no metálicos, como se ilustra en la figura 27.18. El chorro de agua actúa como sierra y corta una ranura angosta en el material (vea también *granallado con chorro de agua*, sección 34.2).

En la figura 27.18b se muestra una máquina de corte con chorro de agua. Son varios los materiales que pueden cortarse con este método, entre ellos plásticos, telas, hule, productos de madera, papel, cuero, materiales aislantes, ladrillo y materiales compósitos (figura 27.18c). Por lo general se utiliza un nivel de presión de alrededor de 400 MPa (60 ksi) para tener una operación eficiente, aunque se pueden generar presiones tan altas como 1400 MPa (200 ksi). Los diámetros de la boquilla varían entre 0.05 y 1 mm (0.002 y 0.040 pulg).

En función de los materiales, el espesor llega a ser de hasta 25 mm (1 pulg) e incluso mayor. El vinil y las cubiertas de espuma para los tableros de automóviles, así como ciertos paneles, se pueden cortar en ejes múltiples por medio de equipo de maquinado con chorro de agua robotizado. Debido a que es una operación eficiente y limpia, en comparación con otros procesos de corte, también se usa en la industria procesadora de comida para cortar y rebanar productos alimenticios. El proceso también puede emplearse para eliminar las rebabas de los materiales.

Ventajas del maquinado con chorro de agua:

- Los cortes pueden comenzar en cualquier sitio sin necesidad de practicar barrenos previamente.
- No se produce calor.

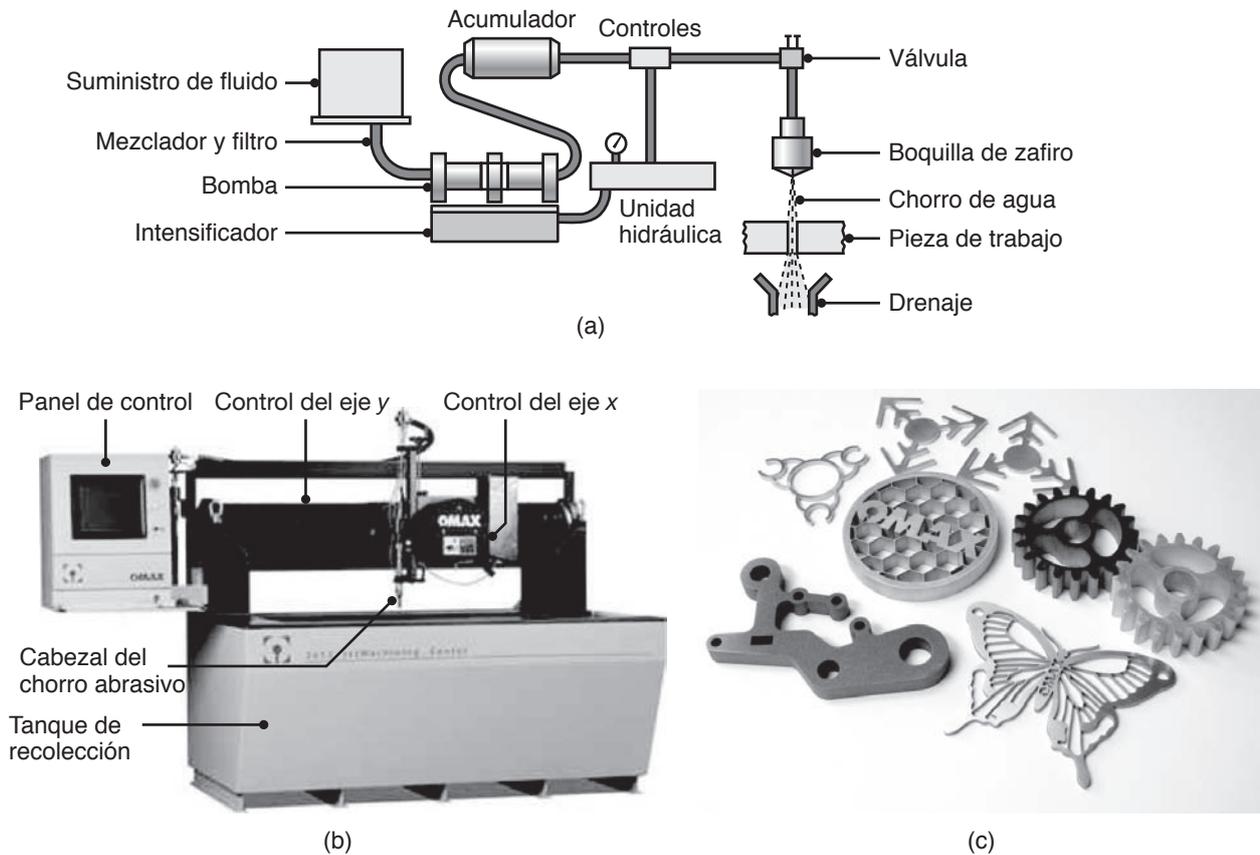


FIGURA 27.18 (a) Ilustración esquemática del proceso de maquinado con chorro de agua. (b) Máquina de corte con chorro de agua controlada por computadora. (c) Ejemplos de distintas partes no metálicas producidas con el proceso de corte con chorro de agua. *Fuente:* Cortesía de OMAX Corporation.

- No hay deflexiones del resto de la pieza de trabajo, por lo que el proceso es adecuado para trabajar materiales flexibles.
- Hay poco humedecimiento de la pieza de trabajo.
- Las rebabas que se producen son mínimas.
- Es una operación de manufactura segura para el ambiente.

Maquinado con chorro de agua abrasivo. En el *maquinado con chorro de agua abrasivo* (AWJM, por sus siglas en inglés), el líquido contiene partículas abrasivas como carburo de silicio u óxido de aluminio, lo cual incrementa mucho la tasa de remoción de material. Es posible cortar materiales metálicos, no metálicos y materiales compósitos avanzados de varios espesores, en una sola capa o en varias capas. En los sistemas modernos de AWJM, el nivel óptimo de abrasivos en el chorro se controla de manera automática. Es común que las boquillas estén hechas de rubíes, zafiros y diamante (figura 27.18a).

El maquinado con chorro de agua abrasivo es particularmente apropiado para materiales sensibles al calor que no se pueden maquinar con procesos en los cuales se genera calor. Las velocidades de corte pueden ser tan altas como de hasta 7.5 m/min (25 pies/min) para plásticos reforzados, pero son mucho más bajas para los metales; en consecuencia, el proceso puede no ser rentable para aplicaciones que requieran altas tasas de producción.

Al hacer barrenos, el tamaño mínimo que a la fecha puede producirse de manera satisfactoria es de alrededor de 400 μm (0.015 pulg) y su profundidad máxima es del orden de 25 mm (1 pulg).

Con máquinas de ejes múltiples y controladas por robot, es posible maquinar de manera rentable partes complejas tridimensionales hasta sus dimensiones de acabado.

27.9 Maquinado con chorro abrasivo

En el *maquinado con chorro abrasivo* (AJM, por sus siglas en inglés), se impulsan partículas abrasivas hacia la superficie de la pieza de trabajo mediante un chorro de alta velocidad de aire seco, nitrógeno o dióxido de carbono (figura 27.19). El impacto de las partículas desarrolla una fuerza concentrada (vea también la sección 26.6) lo bastante grande como para remover material en casos de (a) corte de orificios pequeños, ranuras o patrones intrincados en materiales metálicos y no metálicos muy duros o quebradizos, o bien (b) eliminar las rebabas o remover pequeñas porciones de ciertas partes, (c) recortar y redondear bordes, (d) retirar óxidos y otras películas de la superficie y (e) limpiar componentes con superficies irregulares.

La presión del gas es del orden de 850 kPa (125 psi), y la velocidad del chorro abrasivo llega a ser hasta de 300 m/s (100 pies/s). Las boquillas suelen ser de carburo de tungsteno o zafiro, ambas con resistencia al desgaste por abrasión. El tamaño del abrasivo está en el rango de 10 a 50 μm (400 a 2000 μpulg). Debido a que el flujo de los abrasivos libres tiende a redondear las esquinas, deben evitarse en los diseños que empleen este método. Asimismo, los orificios tienden a ser reducidos porque los abrasivos desgastan preferentemente el lado interno. Hay cierto peligro implícito al usar este proceso debido a las partículas suspendidas en el aire, problema que no existe en el maquinado con chorro de agua.

27.10 Sistemas de maquinado híbrido

Un desarrollo más reciente en los procesos de remoción de material es el concepto de *sistemas de maquinado híbrido*. En un sistema están *combinados* dos o más procesos de maquinado individuales, de modo que se aprovechan las ventajas de las capacidades de cada uno y se incrementa la velocidad de producción, por lo que mejora la eficiencia de la operación. El sistema es capaz de manejar distintos materiales, como metales, cerámicos, polímeros y compósitos. Entre los ejemplos de los sistemas de maquinado híbrido se encuentran combinaciones e integración de los procesos siguientes:

1. Maquinado abrasivo y maquinado electroquímico.
2. Maquinado abrasivo y maquinado por descarga eléctrica.
3. Maquinado abrasivo y acabado electroquímico.

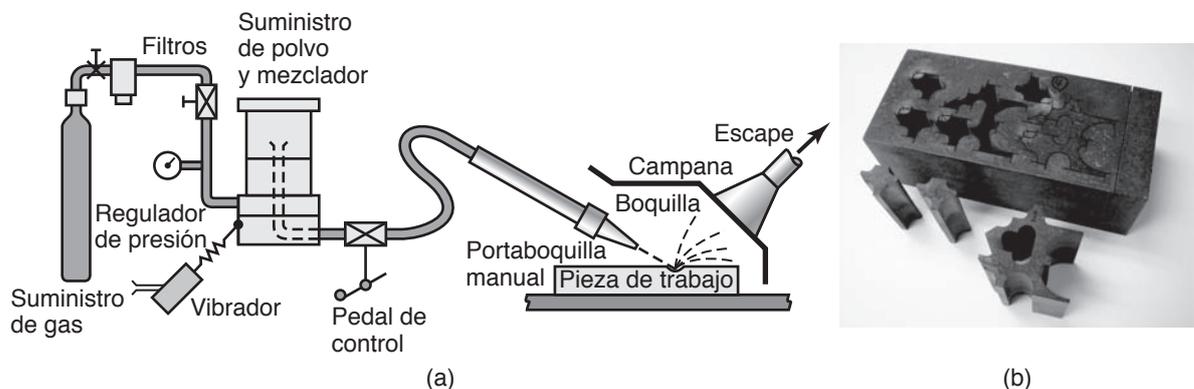


FIGURA 27.19 (a) Ilustración esquemática del proceso de maquinado con chorro abrasivo. (b) Ejemplos de partes elaboradas por medio de maquinado con chorro abrasivo, producidas en acero inoxidable 304 con un espesor de 50 mm (2 pulg). Fuente: Cortesía de OMAX Corporation.

4. Corte con chorro de agua y maquinado por descarga eléctrica con alambre.
5. Fresado de alta velocidad, ablación con láser y chorro abrasivo, como un ejemplo de *tres* procesos integrados.
6. Maquinado y chorro abrasivo.
7. Maquinado electroquímico y por descarga eléctrica (ECDM, por sus siglas en inglés), también llamado maquinado por chispa electroquímica (ECSM, por sus siglas en inglés).
8. Procesos de maquinado y conformado, como el corte con láser y el punzonado de láminas metálicas, descritos en el ejemplo 27.1.
9. Combinaciones de diferentes procesos de formado, maquinado y unión.

La implementación de estos conceptos y el desarrollo de la maquinaria apropiada y sistemas de control, presenta importantes dificultades. Entre las consideraciones importantes se encuentran factores como los siguientes:

1. El material de la pieza de trabajo y sus características de manufactura; vea, por ejemplo, la tabla 1.3 en la introducción general.
2. Compatibilidad de los parámetros de procesamiento entre los dos o más procesos por integrar, como velocidad, tamaño, fuerza, energía y temperatura.
3. Tiempos del ciclo de cada operación individual involucrada, así como su sincronización.
4. Consideraciones de seguridad y posibles efectos perjudiciales a partir de la presencia de varios elementos como abrasivos, productos químicos, partículas del desgaste, virutas y contaminantes en el conjunto de la operación.
5. Consecuencia de una falla en una de las etapas del sistema, puesto que la operación implica procesos secuenciales.

27.11 Economía de los procesos de maquinado avanzado

Los procesos de maquinado avanzado tienen aplicaciones únicas y son útiles en particular para trabajar materiales difíciles de maquinar y partes con perfiles complejos internos y externos. La corrida de producción rentable para un proceso en particular depende de factores como (a) costos de las herramientas y el equipo; (b) costos de operación; (c) tasa de remoción de material que se requiere; (d) nivel de la capacidad del operador que se necesita y (e) las operaciones secundarias y de acabado que tal vez sean necesarias posteriormente.

En el maquinado químico, proceso inherentemente lento, un factor importante es el costo de los reactivos, máscaras y eliminación de los desechos, así como el costo de la limpieza de las partes. En el maquinado por descarga eléctrica, el costo de los electrodos y la necesidad de sustituirlos periódicamente llega a ser significativo. La tasa de remoción de material y la tasa de producción varían en forma importante en los procesos descritos, como puede verse en la tabla 27.1. El costo de las herramientas y el equipo también varía considerablemente, al igual que la capacidad que se requiere del operador. La gran inversión de capital para las máquinas, como la que se necesita para el maquinado eléctrico y con haz de alta energía, en especial cuando se equipan con control robótico, tiene que justificarse en términos de las corridas de producción y la factibilidad de manufacturar la misma parte por otros medios, si fuera posible.

CASO DE ESTUDIO 27.2 Manufactura de pequeños satélites

Los satélites construidos a principios de la Era Espacial (en la década de 1960) eran muy grandes, los de menos de 1000 kg eran muy raros. La tabla 27.3 muestra la

clasificación de los satélites modernos según su masa. Este caso de estudio describe la manufactura de los sistemas de propulsión para microsátélites y nanosatélites.

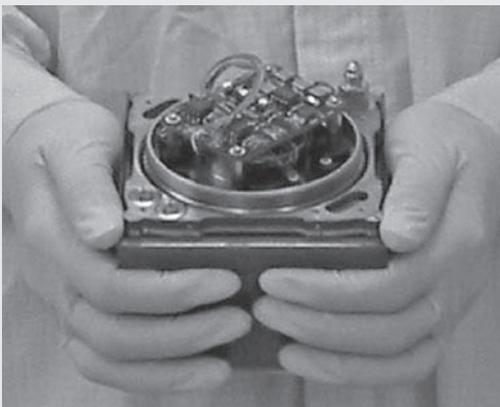
(continúa)

Hay varias razones que obligan a reducir el tamaño de los satélites, ninguna más importante que el costo de ponerlos en órbita. Uno de los sistemas que más contribuyen al peso de un satélite es el de propulsión, el cual es esencial para cambiar su órbita o corregir cualquier deriva. La figura 27.20a muestra el sistema de propulsión de un microsátélite que incorpora varios microimpulsores de gas frío, un tanque de almacenamiento de combustible, filtros y sensores de temperatura y presión.

En la figura 27.20b se presentan componentes seleccionados del sistema de propulsión. Observe que la producción de estas partes miniaturizadas sería difícil si se hiciera con las tecnologías convencionales de formado, fundido o maquinado. Además, conectar la tubería entre todos los componentes sería muy difícil, aun con componentes más grandes, y casi imposible de realizar en el ambiente de un espacio limpio.

TABLA 27.3

Nombre del grupo	Masa	
	kg o g	lb
Satélite grande	>1000 kg	2200
Satélite mediano	500-1000	1100-2200
Minisatélite	100-500	2200-1100
Satélites pequeños		
Microsatélite	10-100	22-220
Nanosatélite	1-10	2.2-22
Picosatélite	0.1-1	0.22-2.2
Femtosatélite	<100 g	<0.22

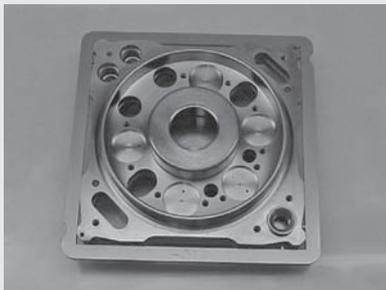


(a)



(b)

FIGURA 27.20 Sistema de propulsión para un satélite pequeño. (a) Sistema miniaturizado apropiado para un microsátélite o un nanosatélite y (b) componentes seleccionados del sistema de propulsión. Fuente: Cortesía de R. Hoppe, VACCO Industries, Inc.



(a)



(b)



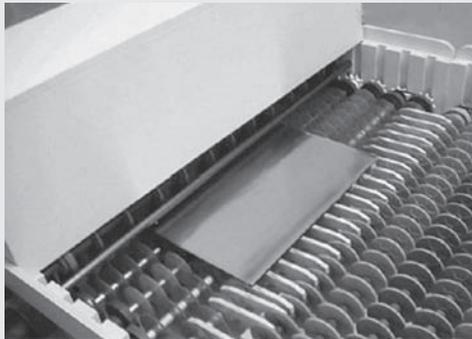
(c)

FIGURA 27.21 Componentes grabados y troquelados fotoquímicamente para micro y nanosatélites. (a) Tablero de montaje que incorpora canales para el fluido en un paquete integrado; (b) resorte de válvula a microescala, colocado junto a una moneda estadounidense de un centavo, y (c) filtro de combustible. Fuente: Cortesía de R. Hoppe, VACCO Industries, Inc.

Una alternativa atractiva es la producción de un sistema integrado, con conexiones para el fluido, construidas internamente por medio de un grabado fotoquímico y un apoyo adherido por difusión, en el cual los componentes se sueldan o sujetan mecánicamente. En la figura 27.21 aparece dicho apoyo, junto con re-

sortes para válvula y filtros producidos con una combinación de procesos de troquelado y de adherencia por difusión.

La figura 27.22 ilustra la secuencia de manufactura implicada. Es común el uso del titanio para los componentes de los sistemas de propulsión, ya que tiene una



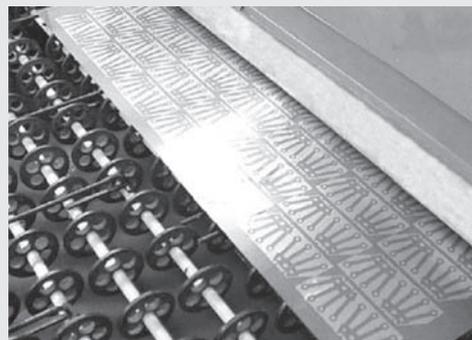
(a)



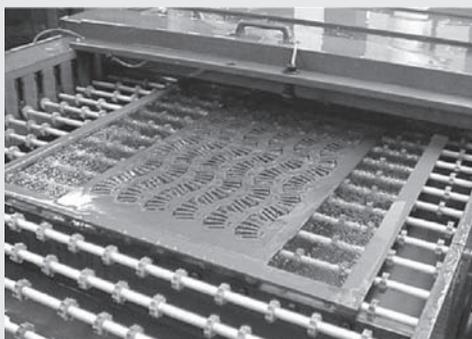
(b)



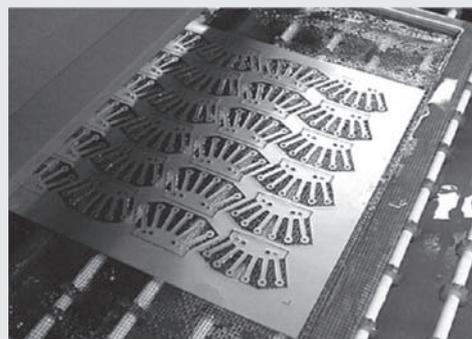
(c)



(d)



(e)



(f)

FIGURA 27.22 Secuencia de procesamiento para el grabado fotoquímico de los componentes de un microsátélite: (a) limpieza de la materia prima; (b) recubrimiento con un material fotosensible; (c) exposición con herramienta fotográfica; (d) desarrollo de una imagen resistente; (e) grabado y (f) remoción del bastidor. *Fuente:* Cortesía de R. Hoppe, VACCO Industries, Inc.

(continúa)

alta razón de resistencia a peso, lo que hace posibles los diseños ligeros. Se prepara una máscara, como se describió en la sección 27.2, y se graba o troquela el titanio en una solución de ácido hidrofúrico. Después se adhieren capas múltiples de titanio por difusión (vea la sección 31.7) para producir características internas como canales de flujo.

Estos sistemas completamente integrados dan como resultado la producción de sistemas de propulsión de satélites que son menos complejos, más robustos y no tan voluminosos como los de diseños anteriores.

Fuente: Basado en R. Hoppe, VACCO Industries, Inc.

RESUMEN

- Los procesos de maquinado avanzado tienen capacidades únicas, utilizan fuentes de energía química, electroquímica, eléctrica y haces de alta energía. Las propiedades mecánicas del material de la pieza de trabajo no son significativas, ya que estos procesos se basan en mecanismos que no implican la resistencia, dureza, ductilidad o tenacidad del material; antes bien, comprenden las propiedades físicas, químicas y eléctricas.
- Los métodos químico y eléctrico de maquinado son apropiados en particular para los materiales duros y las partes de forma compleja. No producen fuerzas (y por tanto se pueden usar con piezas de trabajo delgadas, esbeltas y flexibles), temperaturas elevadas o esfuerzos residuales. Sin embargo, deben considerarse los efectos de estos procesos en la integridad de la superficie, ya que pueden dañarla y reducirían la vida de fatiga del producto.
- Los procesos de maquinado con haz de alta energía básicamente utilizan rayos láser, haz de electrones y rayos de plasma. Tienen aplicaciones industriales importantes, con controles robóticos poseen una gran flexibilidad de operación, y en lo económico son competitivos con otros procesos.
- Los procesos de maquinado con chorro de agua, chorro de agua abrasivo y chorro abrasivo pueden usarse para las operaciones de corte así como para las de eliminación de rebabas. Debido a que no emplean herramientas duras, tienen implícita la flexibilidad de operación.
- Los procesos de maquinado híbrido ofrecen posibilidades para la producción eficiente de partes complejas, al combinar dos o más procesos, por lo que se reducen los tiempos de producción.

TÉRMINOS CLAVE

Corte con arco de plasma	Láser	Maquinado electroquímico	Socavamiento
Dieléctrico	Láser Microjet	Maquinado fotoquímico	Tallado de dados
EDM con alambre o de hilo	Maquinado con arco azul	Maquinado híbrido	Trepanado electrolítico
EDM sin desgaste	Maquinado con chorro abrasivo	Maquinado por haz de electrones	Troquelado fotoquímico
Electrodo	Maquinado con chorro de agua abrasivo	Maquinado químico	Troquelado químico
Electroerosión o maquinado por descarga eléctrica	Maquinado con chorro de agua abrasivo	Pulido electroquímico	
Electrolito	Maquinado con pulso electroquímico	Reactivo	
Fotograbado	Maquinado con pulso electroquímico	Rectificado electroquímico	
Fotoresistente	Maquinado con rayo láser	Rectificado por descarga eléctrica	
Fresado químico	Maquinado electrolítico para formas tubulares	Rectificado por descarga electroquímica	
Grabador			
Haz de plasma			

BIBLIOGRAFÍA

- Asibu, Jr., E. K., *Principles of Laser Materials Processing*, Wiley, 2009.
- Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
- Dahotre, N. B. y Samant, A., *Laser Machining of Advanced Materials*, CRC Press, 2011.
- El-Hofy, H., *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes*, McGraw-Hill, 2005.
- Grzesik, W., *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications*, Elsevier, 2008.
- Guitrau, E. B., *The EDM Handbook*, Hanser, 2009.
- Jameson, E. C., *Electrical Discharge Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 2001.
- Marinescou, I. D., Uhlmann, E. y Doi, T., *Handbook of Lapping and Polishing*, CRC Press, 2006.
- Momber, A. W. y Kovacevic, R., *Principles of Abrasive Water Jet Machining*, Springer, 1998.
- Steen, W. M. y Mazumder, J., *Laser Material Processing*, 4a. ed., Springer, 2010.

PREGUNTAS DE REPASO

- 27.1** Describa las similitudes y diferencias entre el troquelado químico y el convencional con el uso de dados.
- 27.2** Mencione los procesos involucrados en el maquinado químico. Describa brevemente sus principios.
- 27.3** Explique la diferencia entre el maquinado químico y el electroquímico.
- 27.4** ¿Cuál es el principio que caracteriza al rectificado electroquímico?
- 27.5** Explique cómo puede producir formas complejas el proceso de maquinado por descarga eléctrica.
- 27.6** ¿Cuáles son las características importantes del proceso de maquinado con arco azul?
- 27.7** ¿Cuáles son las capacidades del EDM con alambre? ¿Podría este proceso usarse para producir partes con ahusamientos? Explique.
- 27.8** Explique por qué el láser Microjet tiene una gran profundidad de campo.
- 27.9** Describa las ventajas del maquinado con chorro de agua.
- 27.10** ¿Cuál es la diferencia entre el troquelado fotoquímico y el químico?
- 27.11** ¿Qué tipo de pieza de trabajo no es apropiada para maquinarse con rayo láser?
- 27.12** ¿Qué es un socavamiento? ¿Por qué debe considerarse en el maquinado químico?
- 27.13** Explique el principio del maquinado híbrido.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 27.14** Aporte razones técnicas y económicas por las cuales los procesos descritos en este capítulo podrían ser preferibles a los que se presentaron en los capítulos anteriores.
- 27.15** ¿Por qué es deseable en ocasiones dar forma o maquinar previamente las partes en los procesos descritos en este capítulo?
- 27.16** Explique por qué las propiedades mecánicas de los materiales de la pieza de trabajo no son significativos en la mayoría de procesos descritos en este capítulo.
- 27.17** Enuncie los procesos que pueden producir orificios con forma, es decir, que no sean circulares.
- 27.18** Mencione las ventajas del láser Microjet sobre el maquinado con láser convencional.
- 27.19** ¿Por qué se ha extendido tanto el uso del maquinado por descarga eléctrica en la industria?
- 27.20** Describa los tipos de partes que son apropiadas para el EDM con alambre.
- 27.21** ¿Cuáles de los procesos de maquinado avanzado causarían un daño térmico? ¿Cuál es la consecuencia de dicho daño para las piezas de trabajo?
- 27.22** ¿Cuáles de los procesos descritos en este capítulo requieren un vacío? Explique por qué.
- 27.23** Describa sus pensamientos acerca del maquinado con rayo láser de materiales no metálicos. Mencione varias aplicaciones posibles, inclusive sus ventajas en comparación con otros procesos.
- 27.24** ¿Son necesarias las operaciones para eliminar las rebabas en ciertas partes construidas con procesos de maquinado avanzado? Explique y dé varios ejemplos específicos.
- 27.25** Enuncie y explique los factores que contribuyen a que haya un acabado deficiente de la superficie en los procesos descritos en este capítulo.
- 27.26** ¿Cuál es el propósito de los abrasivos en el rectificado electroquímico?
- 27.27** ¿Cuáles de los procesos estudiados en este capítulo son apropiados para producir barrenos muy pequeños y profundos? Explique.
- 27.28** ¿Es importante el ancho de abertura o “kerf” en el EDM con alambre? Explique.
- 27.29** Comente sus observaciones sobre la figura 27.4.
- 27.30** ¿Por qué los diferentes procesos de maquinado avanzado pueden afectar en diferentes grados la resistencia a la fatiga de los materiales?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

27.31 Se está produciendo con maquinado electroquímico un barreno de 200 mm de profundidad y 30 mm de diámetro. Es más importante tener una tasa de producción elevada que la calidad de la superficie maquinada. Estime la máxima corriente y el tiempo requerido para llevar a cabo esta operación.

27.32 Si la operación del problema 27.31 se ejecutara en una máquina de descarga eléctrica, ¿cuál sería el tiempo estimado del maquinado?

27.33 Se está ejecutando una operación de corte con rayo láser. La pieza de trabajo que se corta mide 0.5 pulgadas de espesor

y 15 pulgadas de longitud. Si el ancho de abertura tiene $\frac{3}{32}$ pulgadas de ancho, estime el tiempo que se necesita para efectuar esta operación.

27.34 Se maquina una placa de cobre de 0.80 pulgadas de espesor con maquinado por descarga eléctrica con alambre. El cable se mueve a una velocidad de 4 pies/min y el ancho de abertura es de $\frac{1}{16}$ pulg. ¿Cuál es la potencia requerida? Tenga presente que se necesitan 1550 J (2100 pies/lb) para fundir un gramo de cobre.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

27.35 Explique por qué es difícil producir perfiles y esquinas afilados con algunos de los procesos descritos en este capítulo.

27.36 Elabore una lista de los procesos estudiados en este capítulo en los cuales sean relevantes las propiedades siguientes: (a) mecánica; (b) química; (c) térmica y (d) eléctrica. ¿Hay procesos en los cuales sean importantes dos o más de estas propiedades? Explique.

27.37 ¿Serían difíciles de ejecutar los procesos mencionados en este capítulo en varios materiales no metálicos o parecidos al hule? Explique su razonamiento, comente acerca de la influencia de las distintas propiedades físicas y mecánicas de los materiales de la pieza de trabajo, geometrías de la parte, etcétera.

27.38 Describa los tipos de partes que serían apropiados para el maquinado híbrido. Considere una de tales partes y elabore un esquema preliminar de máquina híbrida para producir la parte.

27.39 Describa sus reflexiones acerca de si los procesos descritos en (a) los capítulos 13 a 16 y (b) los capítulos 23 y 24 son apropiados para un sistema híbrido de manufactura de partes. Elabore un dibujo preliminar de una máquina para los dos grupos de procesos enunciados.

27.40 Construya una lista de los procesos de maquinado que serían apropiados para cada uno de los materiales siguientes: (a) cerámicos; (b) hierro fundido; (c) termoplásticos; (d) termofijos; (e) diamante y (f) cobre galvanizado.

27.41 ¿En qué etapa se introduce el abrasivo en el chorro de agua abrasivo cuando se maquina con este proceso? Investigue en la bibliografía existente y prepare una ilustración esquemática del equipo implicado.

27.42 ¿Cómo manufacturaría el lector un disco de metal de gran diámetro, cónico y redondo, con un espesor que disminuyera del centro hacia afuera? Haga los dibujos apropiados.

27.43 Describa las similitudes y diferencias entre los diferentes lineamientos de diseño para los procesos estudiados en este capítulo.

27.44 Describa cualesquiera limitaciones que haya en el tamaño de la pieza de trabajo en los procesos de maquinado avanzado. Aporte ejemplos.

27.45 Sugiera varias aplicaciones de diseño para los tipos de partes que se muestran en la figura 27.5 (vea también la figura 27.18c).

27.46 Con base en los temas cubiertos en las partes III y IV, construya una tabla exhaustiva de los procesos para hacer orifi-

cios. Describa las ventajas y limitaciones de cada método y haga comentarios acerca de la calidad e integridad de la superficie de las perforaciones producidas.

27.47 Revise el ejemplo 27.1 y explique los parámetros relevantes involucrados; después diseñe un sistema en el que puedan usarse en combinación ambos procesos para producir partes de una placa metálica.

27.48 La elaboración de superficies con números y letras con fines de identificación de partes puede hacerse con varios métodos mecánicos y no mecánicos. Con base en los procesos descritos en el libro hasta este momento, haga una lista de dichos métodos y explique sus ventajas y limitaciones, así como sus aplicaciones comunes.

27.49 El término *ingeniería de precisión* se utiliza para describir la manufactura de partes de alta calidad con tolerancias dimensionales estrictas y buen acabado de la superficie. Con base en las capacidades del proceso, construya una lista de los procesos de maquinado avanzado en orden decreciente de la calidad de las partes producidas. Comente sus observaciones.

27.50 Con dibujos apropiados, describa los principios de los distintos métodos y dispositivos de sujeción del trabajo que se pueden utilizar para los procesos descritos en este capítulo.

27.51 Conforme una tabla de las capacidades de los procesos de maquinado avanzado que se describen en este capítulo. Use varias columnas y describa las máquinas implicadas, el tipo de herramientas y materiales empleados, las formas de los materiales originales y las partes producidas, los tamaños máximo y mínimo que sean comunes, acabado de la superficie, tolerancias y tasas de producción.

27.52 Una de las preocupaciones generales acerca de los procesos de maquinado avanzado es que, a pesar de sus muchas ventajas, por lo general son más lentos que las operaciones de maquinado convencional. Haga una investigación sobre las velocidades, tiempos de maquinado y tasas de producción involucradas y prepare una tabla comparativa de las capacidades respectivas de cada proceso.

27.53 Puede verse que varios de los procesos descritos en la parte IV de este libro se pueden emplear ya sea aislados o en combinación, para elaborar o dar acabado a dados para las operaciones de trabajo de metales. Escriba un breve artículo técnico acerca de dichos métodos, donde mencione sus ventajas, limitaciones y aplicaciones comunes.

Micromanufacturing and Fabrication of Microelectronic Devices

PART V

The importance of the topics covered in the following two chapters can best be appreciated by considering the manufacture of a simple metal spur gear. It is important to recall that some gears are designed to transmit *power*, such as those in gear boxes, yet others transmit *motion*, such as in rack and pinion mechanisms in automobile steering systems. If the gear is, say, 100 mm (4 in.) in diameter, it can be produced by traditional methods, such as starting with a cast or forged blank, and machining and grinding it to its final shape and dimensions. A gear that is only 2 mm (0.080 in.) in diameter, on the other hand, can be difficult to produce by these methods. If sufficiently thin, the gear could, for example, be made from sheet metal, by fine blanking, chemical etching, or electroforming.

If the gear is only a *few micrometers* in size, it can be produced by such techniques as optical lithography, wet and dry chemical etching, and related processes. A gear that is only a *nanometer* in diameter would, however, be extremely difficult to produce; indeed, such a gear would have only a few tens of atoms across its surface.

The challenges faced in producing gears of increasingly smaller sizes is highly informative, and can be put into proper perspective by referring to the illustration of length scales shown in Fig. V.1. Conventional manufacturing processes, described in Chapters 11 through 27, typically produce parts that are larger than a millimeter or so, and can be described as visible to the naked eye. The sizes of such parts generally are referred to as **macroscale**, the word “macro” being derived from the Greek *makros*, meaning “long,” and the processing of such parts is known as **macromanufacturing**. Macroscale is the most developed and best understood size range from a design and manufacturing standpoint, with a very wide variety of processes available for producing components of that size. All of the examples and case studies given thus far have been examples of macromanufacturing.

Note that the gear shown in Fig. V.1 is a few tens of micrometers across, and thus fits into the category of **micromanufacturing**, developed mostly for electronic devices of all types, including computer processors and memory chips, sensors, and magnetic storage devices. For the most part, this type of manufacturing relies heavily on lithography, wet and dry etching, and coating techniques. Examples of products that rely on micromanufacturing techniques are a wide variety of sensors and probes (see Fig. V.2), ink-jet printing heads, microactuators, magnetic hard-drive heads, and such devices as computer processors and memory chips. Microscale mechanical devices are still a relatively new technology, but one that has been developing rapidly.

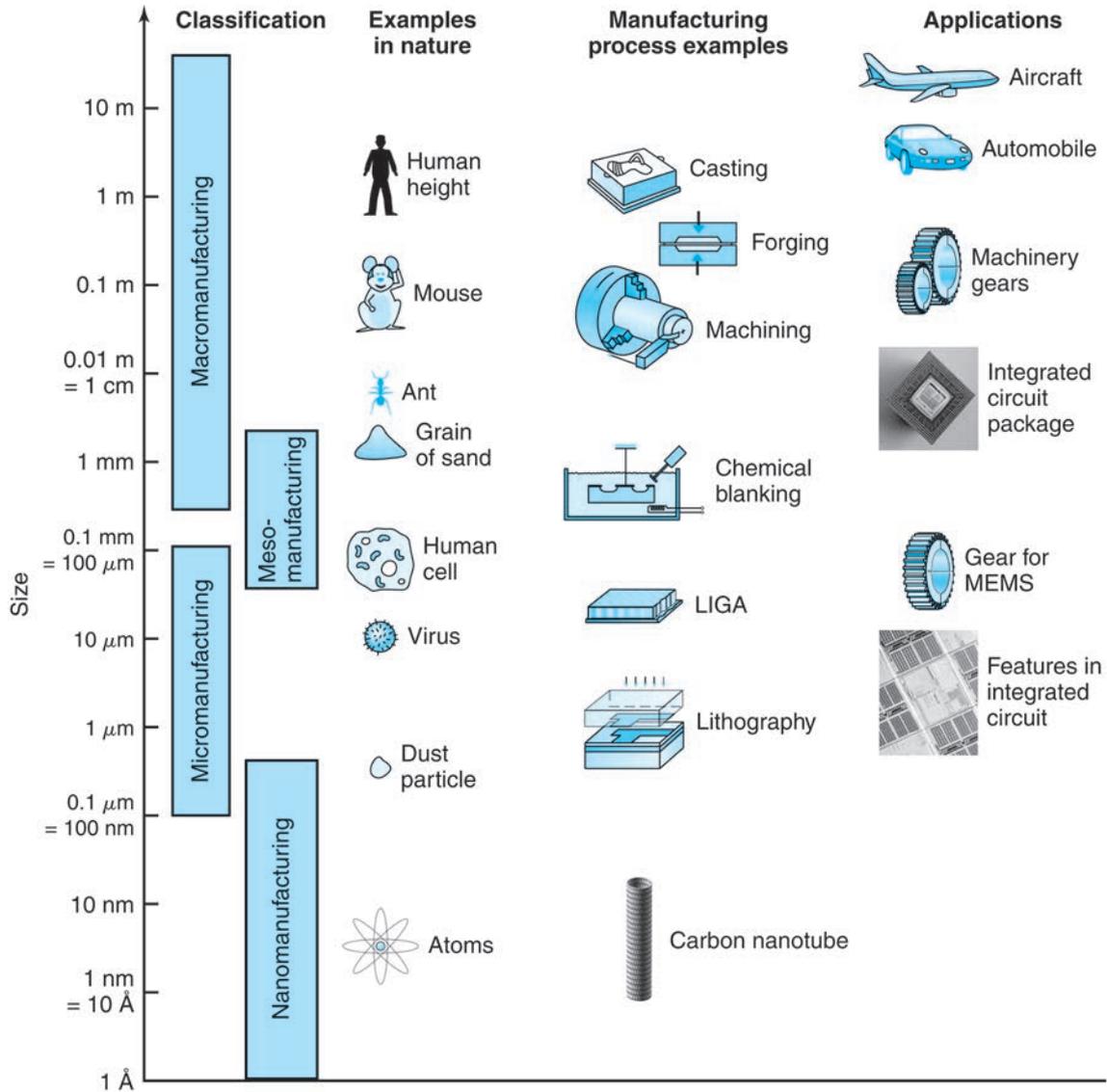


FIGURE V.1 Illustration of the regimes of macro-, meso-, micro-, and nanomanufacturing, the range of common sizes of parts, and the capabilities of manufacturing processes in producing these parts.

Mesomanufacturing overlaps macro- and micromanufacturing, as seen by the illustrations given in Fig. V.1. Examples of mesomanufacturing are extremely small motors, bearings, and components for miniature devices, such as hearing aids, stents, heart valves, and electronic toys, with components the same as the gear shown in Fig. V.1.

In **nanomanufacturing**, parts are produced at scales of one billionth of a meter, typically between 10^{-6} and 10^{-9} m in length; many of the features in integrated circuits are at this length scale. *Biomanufacturing*, covering such areas as molecularly engineered pharmaceutical products, genetic testing, gene therapy, and agricultural products, are at nanoscale level, and it is now recognized that many physical and

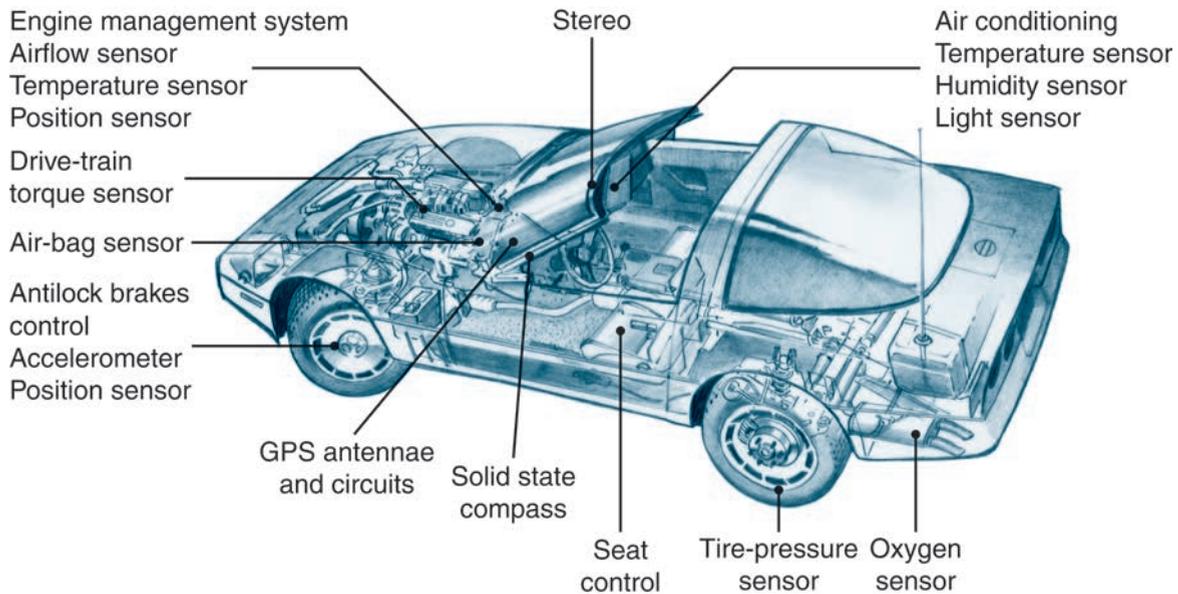


FIGURE V.2 Microelectronic and microelectromechanical devices and parts used in a typical automobile.

biological processes act at this scale and that nanomanufacturing holds much promise for future innovations.

In Chapter 28, the manufacture of silicon wafers and microelectronic devices is described, which include a wide variety of computer processors, memory devices, and integrated circuits. Controls, transportation, communications, engineering design and manufacturing, medicine, and entertainment all have been changed greatly by the wide availability of *metal-oxide-semiconductor (MOS) devices*, generally based on single-crystal silicon. Microelectronics is the best known and commercially important example of micromanufacturing, with some aspects of the applications exemplifying nanomanufacturing. The chapter also covers the techniques used in packaging and assembling integrated circuits onto printed circuit boards.

The production of microscale devices, that are mechanical and electrical in nature, is described in Chapter 29. Depending on their level of integration, these devices are called **micromechanical devices** or **microelectromechanical systems (MEMS)**. While the historical origins of MEMS manufacture stem from the same processes used for microelectronic systems, and from identical processes and production sequences, still in use, several unique approaches also have been developed.

28.1	Introduction	800
28.2	Clean Rooms	803
28.3	Semiconductors and Silicon	804
28.4	Crystal Growing and Wafer Preparation	805
28.5	Film Deposition	807
28.6	Oxidation	809
28.7	Lithography	810
28.8	Etching	818
28.9	Diffusion and Ion Implantation	825
28.10	Metallization and Testing	827
28.11	Wire Bonding and Packaging	830
28.12	Yield and Reliability	835
28.13	Printed Circuit Boards	835

EXAMPLES:

28.1	Moore's Law	816
28.2	Comparison of Wet and Dry Etching	825
28.3	Processing of a <i>p</i> -type Region in <i>n</i> -type Silicon	826



QR Code 28.1 Tour of an integrated circuit fabrication facility. (Source: Courtesy of Intel)

- This chapter presents the science and technologies involved in the production of integrated circuits, a product that has fundamentally changed our society.
- The chapter begins by describing silicon, the preferred material for most integrated circuits, and its unique properties that make it attractive. Beginning with a cast ingot, the operations required to produce a wafer are described.
- The production of patterns on wafers is next discussed, including the processes of lithography, wet and dry etching, and doping.
- Metallization and testing are then described, as are the approaches for obtaining electrical connections from integrated circuits to circuit boards.
- The chapter concludes with a description of the different packages used for integrated circuits.

Typical parts produced: Computer processors, memory chips, printed circuit boards, and integrated circuits of all types.

28.1 Introduction

Although semiconducting materials have been used in electronics for a long time (the word semiconductor first appeared in 1838), it was the invention of the *transistor* in 1947 that set the stage for what would become one of the greatest technological achievements in all of history. **Microelectronics** has played an increasing role ever since the *integrated circuit* (IC) technology became the foundation for calculators, wrist watches, controls for home appliances and automobiles, information systems, telecommunications, robotics, space travel, weaponry, and personal computers.

The major advantages of today's ICs are their very small size and low cost. As their fabrication technology has become more advanced, the size and cost of such devices as transistors, diodes, resistors, and capacitors continue to decrease, and the global market has become highly competitive. More and more components can now be put onto a **chip**, a very small piece of semiconducting material on which the circuit is fabricated.

Typical chips produced today have sizes that are as small as 0.5 mm × 0.5 mm and, in rare cases, can be more than 50 mm × 50 mm, if not an entire wafer. New technologies now allow densities in the range of 10 million devices per chip (Fig. 28.1), a magnitude that has been termed **very large scale integration** (VLSI). Some of the advanced ICs may contain more than 100 million devices, termed **ultralarge-scale**

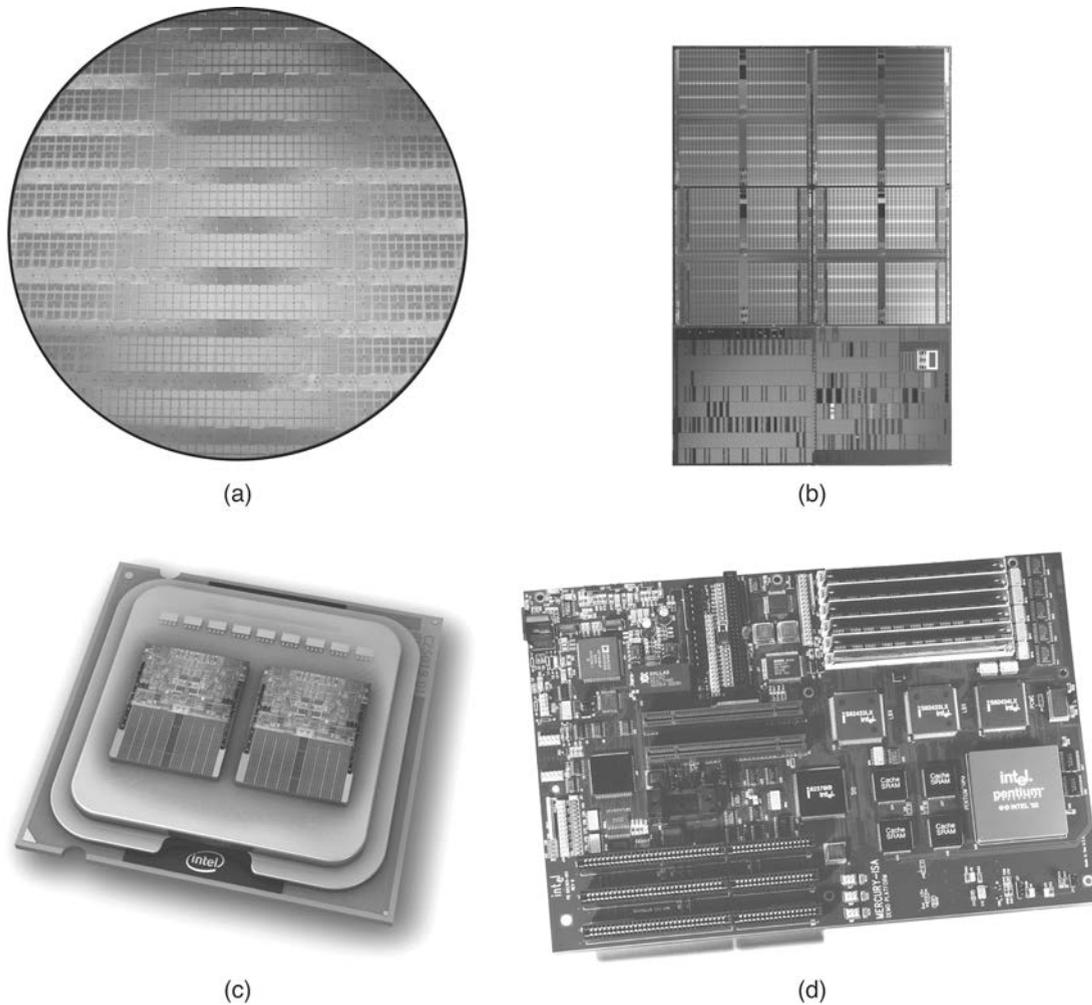
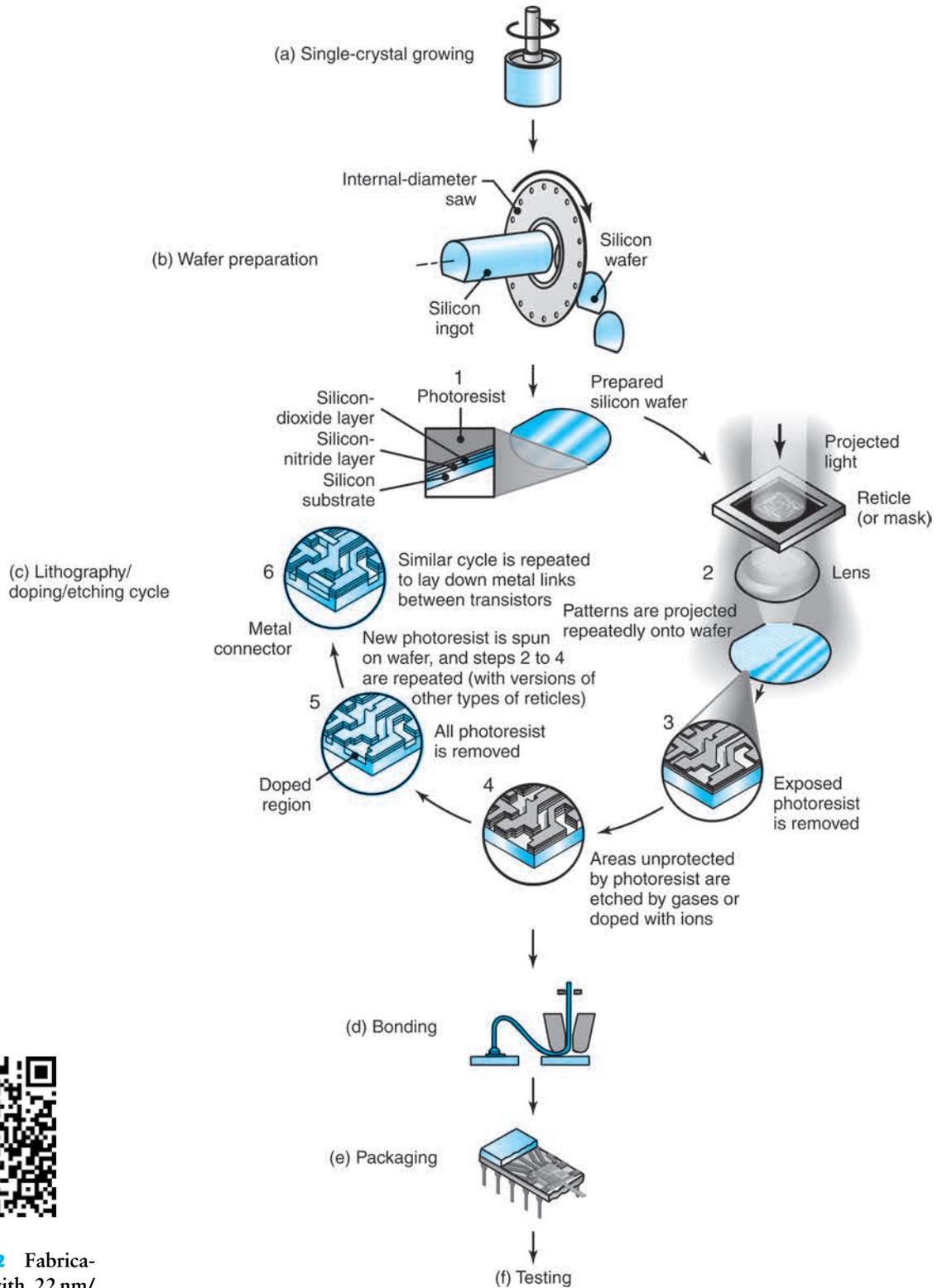


FIGURE 28.1 (a) A 300-mm (11.8-in.) wafer with a large number of dies fabricated onto its surface; (b) detail view of an Intel 45-nm chip, including a 153-Mbit SRAM (static random access memory) and logic test circuits; (c) image of the Intel® Itanium® 2 processor; and (d) Pentium® processor motherboard. *Source:* Courtesy of Intel Corporation.

integration (ULSI). The Intel® Itanium® processors, for example, have surpassed 2 billion transistors, and the Advanced Micro Devices Tahiti® graphic processing unit has surpassed 4.3 billion transistors.

Among more recent advances is **wafer-scale integration** (WSI), in which an entire silicon wafer is used to build a single device. This approach has been of greatest interest in the design of massively parallel supercomputers, including **three-dimensional integrated circuits** (3DICs), which use multiple layers of active circuits, maintaining connections both horizontally and vertically.

This chapter describes the processes that are currently in use in the fabrication of microelectronic devices and integrated circuits, following the basic sequence shown in Fig. 28.2. The major steps in fabricating a **metal-oxide-semiconductor field-effect transistor** (MOSFET), one of the dominant devices used in modern IC technology, are shown in Fig. 28.3.



QR Code 28.2 Fabrication of a chip with 22 nm/3D transistors. (Source: Courtesy of Intel)

FIGURE 28.2 Outline of the general fabrication sequence for integrated circuits.

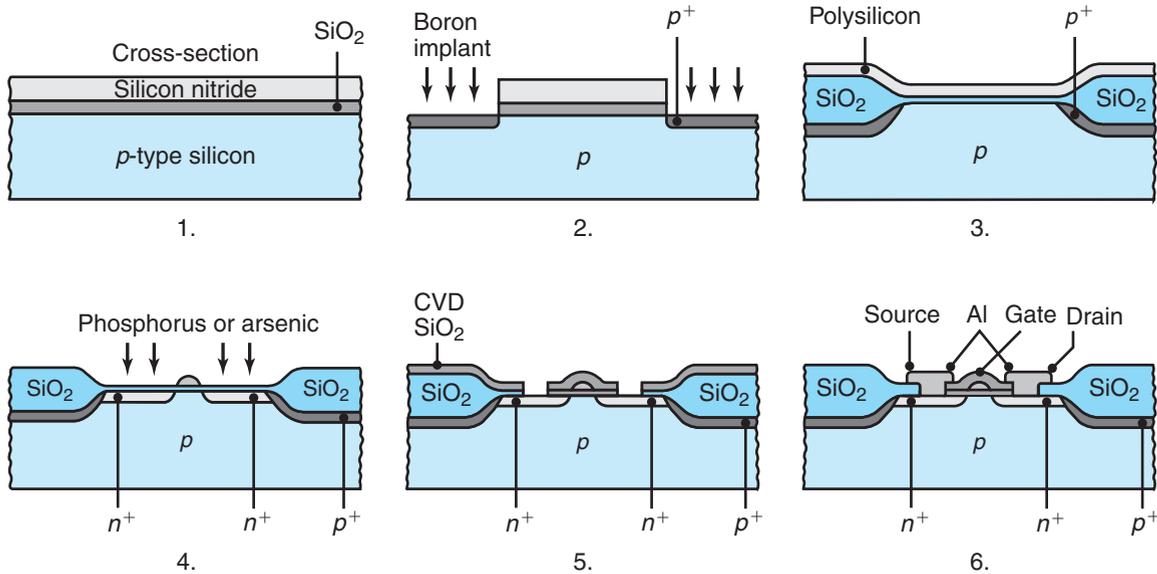


FIGURE 28.3 Cross-sectional views of the fabrication of a MOSFET transistor. *Source:* After R.C. Jaeger.

28.2 Clean Rooms

Clean rooms are essential for the production of integrated circuits, a fact that can be appreciated by noting the scale of manufacturing to be performed. Integrated circuits are typically a few millimeters in length, and the smallest features in a transistor on the circuit may be as small as a few tens of nanometers. This size range is smaller than particles that generally are not considered harmful, such as dust, smoke, and perfume; however, if these contaminants are present on the surface of a silicon wafer during its processing, they can seriously compromise the performance of the entire device.

There are various levels of clean rooms, defined by the class of the room. The size and the number of particles are significant in defining the class of a clean room, as shown in Fig. 28.4. The traditional classification system refers to the number of 0.5- μm or larger particles within a cubic foot of air. Thus, a Class-10 clean room has 10 or fewer such particles per cubic foot. This standard has been superseded by an ISO standard, but the traditional classification scheme is still widely used. Most clean rooms for microelectronics manufacturing range from Class 1 to Class 10; in comparison, the contamination level in modern hospitals is on the order of 10,000 particles per cubic foot.

To obtain controlled atmospheres that are free from particulate contamination, all ventilating air is passed through a *high-efficiency particulate air* (HEPA) filter. In addition, the air usually is

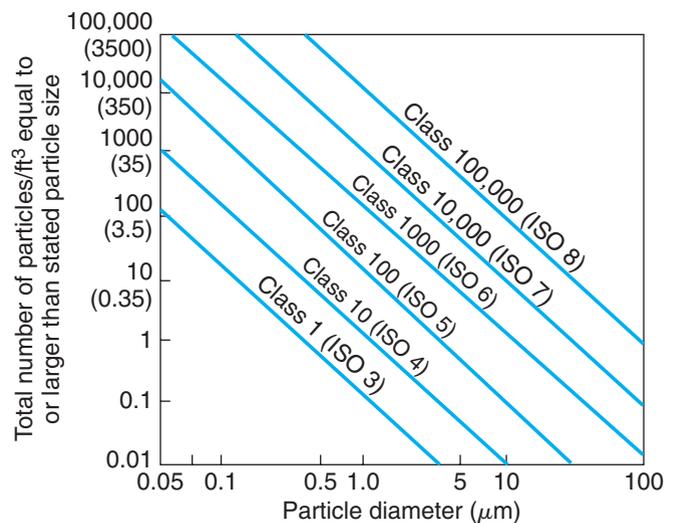


FIGURE 28.4 Allowable particle size counts for various clean-room classes; the numbers in parentheses on the ordinate are particle counts per cubic meter.

conditioned so that it is at 21°C (70°F) and 45% relative humidity. The largest source of contaminants in clean rooms are the workers themselves. Skin particles, hair, perfume, makeup, clothing, bacteria, and viruses are given off naturally by people, and in sufficiently large numbers to quickly compromise a Class-100 clean room. For these reasons, most clean rooms require special coverings, such as white laboratory coats, gloves, and hairnets, as well as the avoidance of perfumes and makeup. The most stringent clean rooms require full-body coverings, called *clean room smocks*. Other precautions include using (a) a ballpoint pen, instead of a pencil, to avoid objectionable graphite particles from pencils and (b) special clean-room paper, to prevent the accumulation of paper particles in the air.

Clean rooms are designed such that the cleanliness at critical *processing areas* is better than in the clean room in general. This is accomplished by always directing the filtered air *from top down* in the clean rooms, and from *floor to ceiling* in the service aisle, a goal that can be facilitated by laminar-flow hooded work areas. To minimize defects, no product is allowed in the service aisle.

28.3 Semiconductors and Silicon

As the name suggests, **semiconductor materials** have electrical properties that lie between those of conductors and insulators; they exhibit resistivities between 10^{-3} and 10^8 Ω -cm. Semiconductors have become the foundation for electronic devices, because their electrical properties can be altered when controlled amounts of selected impurity atoms are added to their crystal structures. These impurity atoms, also known as **dopants**, have either one more valence electron (*n*-type, or negative, dopant) or one less valence electron (*p*-type, or positive, dopant) than the atoms in the semiconductor lattice.

For silicon, which is a Group IV element in the Periodic Table, typical *n*-type and *p*-type dopants include, respectively, phosphorus (Group V) and boron (Group III). The electrical operation of semiconductor devices can thus be controlled through the creation of regions with different doping types and concentrations.

Although the earliest electronic devices were fabricated on *germanium*, **silicon** has become the industry standard. The abundance of alternative forms of silicon in the crust of the Earth is second only to that of oxygen, making it economically attractive. Silicon's main advantage over germanium is its large energy gap (1.1 eV), as compared with that of germanium (0.66 eV). This energy gap allows silicon-based devices to operate at temperatures of about 150°C (270°F), higher than devices fabricated on germanium, which operate at about 100°C (180°F).

Another important processing advantage of silicon is that its oxide (*silicon dioxide*, SiO₂) is an excellent electrical *insulator*, and can be used for both isolation and passivation (see Section 3.8) purposes. By contrast, germanium oxide is water soluble and thus unsuitable for electronic devices. Moreover, the oxidized form of silicon allows the production of **metal-oxide-semiconductor** (MOS) devices, which are the basis for MOS transistors. These materials are used in memory devices, processors, and other devices, and are by far the largest volume of semiconductor material produced worldwide.

Structure of Silicon. The crystallographic structure of silicon is a diamond-type fcc structure, as shown in Fig. 28.5, along with the *Miller indices* of an fcc material. (Miller indices are a useful notation for identifying planes and directions within a unit cell; see also Section 1.3.) A crystallographic plane is defined by the reciprocal of its intercepts with the three axes. Because anisotropic etchants (see Section 28.8.1)

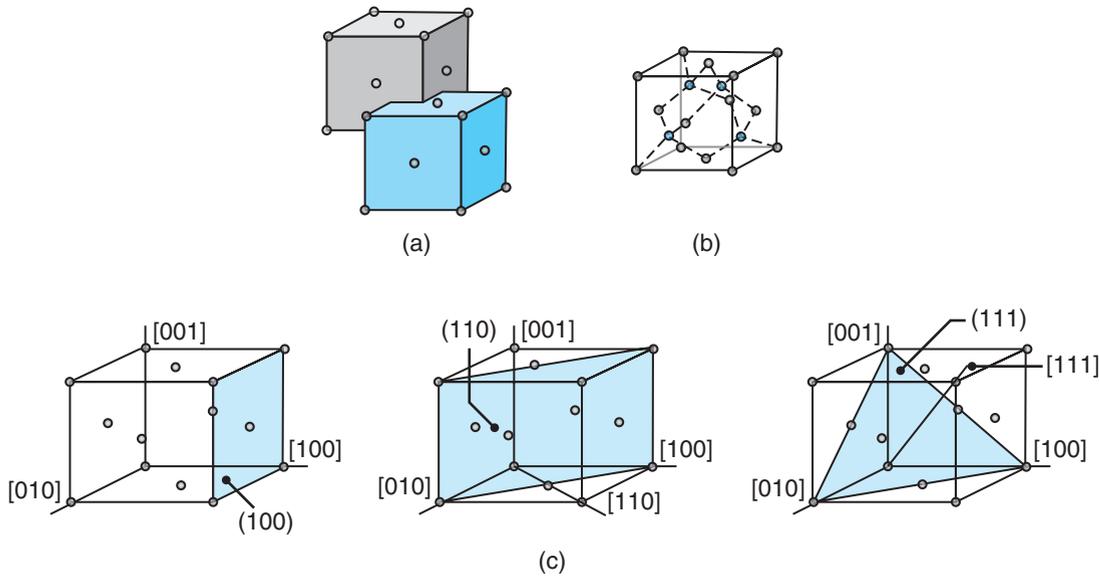


FIGURE 28.5 Crystallographic structure and Miller indices for silicon. (a) Construction of a diamond-type lattice from interpenetrating face-centered cubic cells; one of eight penetrating cells is shown. (b) Diamond-type lattice of silicon; the interiors have been shaded in color. (c) Miller indices for a cubic lattice.

preferentially remove material in certain crystallographic planes, the orientation of the silicon crystal in a wafer is an important consideration.

In spite of its advantages, however, silicon has a larger energy gap (1.1 eV) than germanium oxide and, therefore, has a higher maximum operating temperature (about 200°C; 400°F). This limitation has encouraged the development of *compound semiconductors*, specifically **gallium arsenide**. Its major advantage over silicon is its ability to emit light, thus allowing the fabrication of devices such as lasers and light-emitting diodes (LEDs).

Devices fabricated on gallium arsenide also have much higher operating speeds than those fabricated on silicon. Some of gallium arsenide's disadvantages, on the other hand, are its considerably higher cost, greater processing complications, and, most critically, the difficulty of growing high-quality oxide layers, the need for which is emphasized throughout the rest of this chapter.

28.4 Crystal Growing and Wafer Preparation

Silicon occurs naturally in the forms of silicon dioxide and various silicates. It must, however, undergo a series of purification steps in order to become the high-quality, defect-free, single-crystal material that is necessary for semiconductor device fabrication. The purification process begins by heating silica and carbon together in an electric furnace, which results in a 95–98% pure polycrystalline silicon. This material is converted to an alternative form, commonly trichlorosilane (a compound of silicon, hydrogen, and chlorine), which, in turn, is purified and decomposed in a high-temperature hydrogen atmosphere. The resulting product is extremely high quality *electronic-grade silicon* (EGS).

Single-crystal silicon usually is obtained through the **Czochralski**, or **CZ**, process, described in Section 11.5. The process utilizes a seed crystal that is dipped into

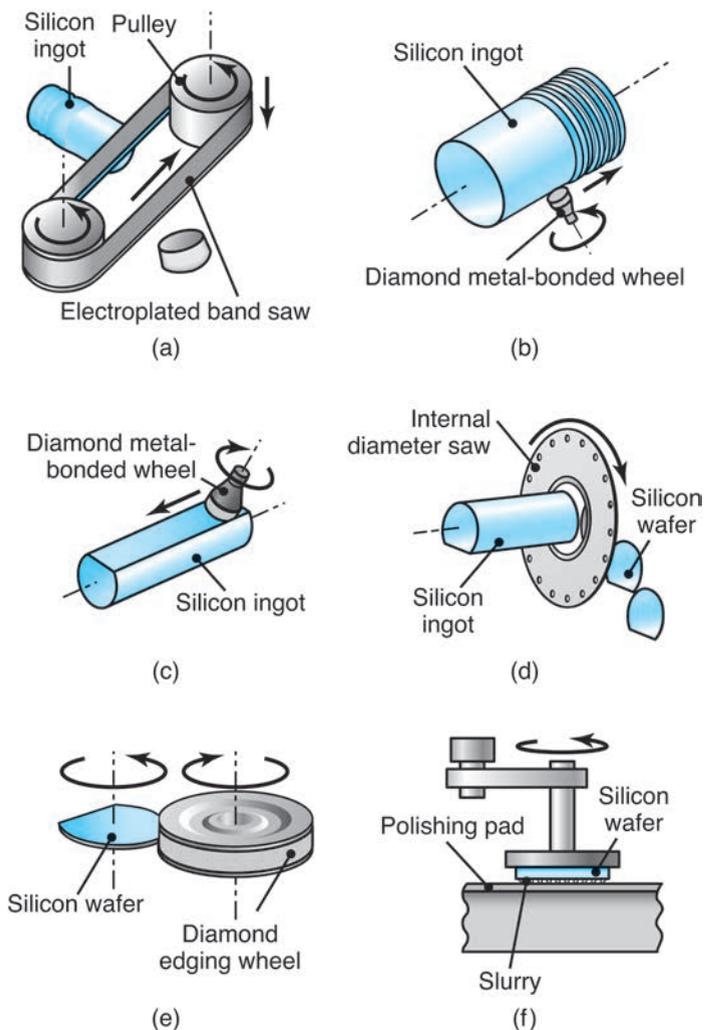


FIGURE 28.6 Finishing operations on a silicon ingot to produce wafers: (a) sawing the ends off the ingot; (b) grinding of the end and cylindrical surfaces of a silicon ingot; (c) machining of a notch or flat; (d) slicing of wafers; (e) end grinding of wafers; and (f) chemical-mechanical polishing of wafers.

a silicon melt, and is then pulled out slowly while being rotated. At this point, controlled amounts of impurities can be added to obtain a uniformly doped crystal. The result of the CZ process is a cylindrical single-crystal ingot, typically 100–300 mm (4–12 in.) in diameter and over 1 m (40 in.) in length. Because this technique does not allow for exact control of the ingot diameter, ingots are grown a few millimeters larger than the required size, and are ground to a desired diameter. Silicon wafers then are produced from silicon ingots, by a sequence of machining and finishing operations, illustrated in Fig. 28.6.

Next, the crystal is sliced into individual wafers, by using an inner-diameter diamond-encrusted blade (Fig. 24.28f), whereby a rotating, ring-shaped blade with its cutting edge on the inner diameter of the ring is utilized. While the substrate depth required for most electronic devices is no more than several microns, wafers typically are cut to a thickness of about 0.5 mm (0.02 in.). This thickness provides the physical support necessary for the absorption of temperature variations and the mechanical support needed during subsequent fabrication of the wafer.

The wafer is then ground along its edges using a diamond wheel. This operation gives the wafer a rounded profile, which is more resistant to chipping. Finally, the wafers must be polished and cleaned, to remove surface damage caused by the sawing process. This operation is commonly performed by *chemical-mechanical polishing*, also referred to as *chemical-mechanical planarization*, described in Section 26.7.

In order to properly control the manufacturing process, it is important to determine the *orientation* of the crystal in a wafer, which is done by notches or flats machined into them for

identification, as shown in Fig. 28.7. Most commonly, the (100) or (111) plane of the crystal defines the wafer surface, although (110) surfaces also can be used for micro-machining applications (Section 29.2). Wafers are also identified by a laser *scribe* mark, produced by the manufacturer. Laser scribing of information may take place on the front or on the back side of the wafer. The front side of some wafers has an exclusion edge area, 3–10 mm in size and reserved for the scribe information, such as lot numbers, orientation, and a wafer identification code unique to the particular manufacturer.

Wafers are typically processed in lots of 25 or 50, with 150–200 mm (6–8 in.) diameters each, or lots of 12–25 with 300-mm (12-in.) diameters each. In this way, they can be easily handled and transferred during subsequent processing steps. Because of the small device size and large wafer diameter, thousands of individual circuits can be placed on one wafer. Once processing is completed, the wafer is then sliced into individual **chips**, each containing one complete integrated circuit.

At this point, the single-crystal silicon wafer is ready for the fabrication of the integrated circuit or device. Fabrication takes place over the entire wafer surface, and thus many chips are produced at the same time, as shown in Fig. 28.1a. Because the number of chips that can be produced is dependent on the cross-sectional area of the wafer, advanced-circuit manufacturers have moved toward using larger single-crystal solid cylinders; 300-mm (12-in.) diameter wafers now are common, with 450-mm (18-in.) diameter wafers under development.

28.5 Film Deposition

Films are used extensively in microelectronic-device processing, particularly insulating and conducting types. Commonly deposited films include polysilicon, silicon nitride, silicon dioxide, and tungsten, titanium, and aluminum. In some cases, the wafers merely serve as a mechanical support, on which custom *epitaxial layers* are grown.

Epitaxy. Defined as the growth of a vapor deposit, *epitaxy*, or *electrodeposit*, occurs when the crystal orientation of the deposit is related directly to the crystal orientation in the underlying crystalline substrate. The advantages of processing on these deposited films, instead of on the actual wafer surface, include fewer impurities, especially carbon and oxygen, improved device performance, and the tailoring of material properties (which cannot be done on the wafers themselves).

Some of the major functions of deposited films are **masking** and protecting the semiconductor surface. In masking applications, the film must both inhibit the passage of dopants and concurrently display an ability to be etched into patterns of high resolution. Upon completion of device fabrication, films are applied to protect the underlying circuitry. Films used for masking and protecting include silicon dioxide, phosphosilicate glass (PSG), and silicon nitride. Each of these materials has distinct advantages, and they often are used in combination.

Conductive films are used primarily for device interconnection. These films must have a low electrical resistivity, be capable of carrying large currents, and be suitable for connection to terminal packaging leads with wire bonds. Generally, aluminum and copper are used for this purpose. Increasing circuit complexity has required up to six levels of conductive layers, all of which must be separated by insulating films.

Film Deposition. Films can be *deposited* by several techniques, involving a variety of pressures, temperatures, and vacuum systems (see also Chapter 34):

- One of the oldest and simplest methods is **vacuum deposition**, used primarily for depositing metal films. The metal is first heated in a vacuum to its point of

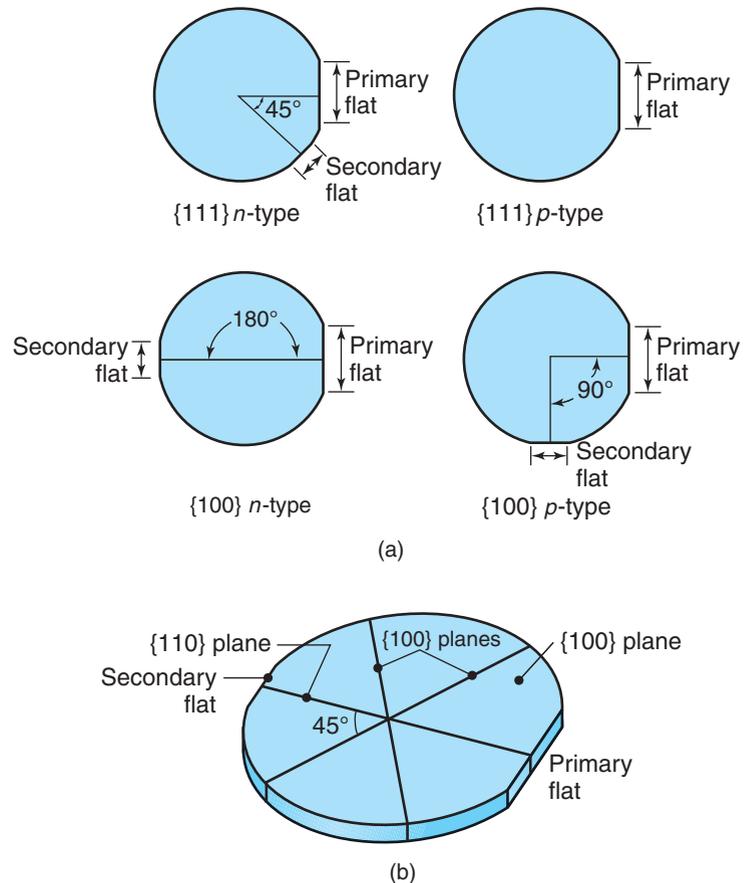


FIGURE 28.7 Identification of single-crystal wafers of silicon; this identification scheme is common for 150-mm (6-in.) diameter wafers, but notches are more common for larger wafers.

vaporization; upon evaporation, it forms a thin layer on the substrate surface. The heat of evaporation usually is generated by a heating filament or electron beam.

- **Sputtering** involves bombarding a target in a vacuum with high-energy ions, usually argon, aluminum, or copper. Sputtering systems generally include a DC power supply to produce the energized ions. As the ions impinge on the target, atoms are knocked off and are subsequently deposited on wafers mounted within the system. Although some argon may be trapped within the film, sputtering results in highly uniform coverage. Recent advances include using a radio-frequency power source (**RF sputtering**) and introducing magnetic fields (**magnetron sputtering**).
- In one of the most common techniques, **chemical-vapor deposition (CVD)**, film is deposited by way of the reaction and/or decomposition of gaseous compounds. Using this technique, silicon dioxide is deposited routinely by the oxidation of silane or a chlorosilane. Figure 28.8a shows a continuous CVD reactor that operates at atmospheric pressure.

A similar method that operates at lower pressures is referred to as **low-pressure chemical-vapor deposition (LPCVD)**, as shown in Fig. 28.8b. Capable of coating hundreds of wafers at a time, this method results in a much higher production rate than that of atmospheric-pressure CVD, and provides superior film uniformity and with less consumption of carrier gases. The technique is commonly used for depositing polysilicon, silicon nitride, and silicon dioxide.

- **Plasma-enhanced chemical-vapor deposition (PECVD)** involves the processing of wafers in an RF plasma containing the source gases. This method has the advantage of maintaining a low wafer temperature during deposition.

Silicon **epitaxy** layers, in which the crystalline layer is formed, using the substrate as a seed crystal, can be grown by a variety of methods. If the silicon is deposited from the gaseous phase, the process is known as **vapor-phase epitaxy (VPE)**. In another variation, the heated substrate is brought into contact with a liquid solution containing the material to be deposited, called **liquid-phase epitaxy (LPE)**.

Another high-vacuum process, called **molecular-beam epitaxy (MBE)**, utilizes evaporation to produce a thermal beam of molecules that are deposited on the heated substrate. This process results in a very high degree of purity. In addition, since the films are grown one atomic layer at a time, it is possible to have excellent control over doping profiles. This level of control is important especially in gallium-arsenide

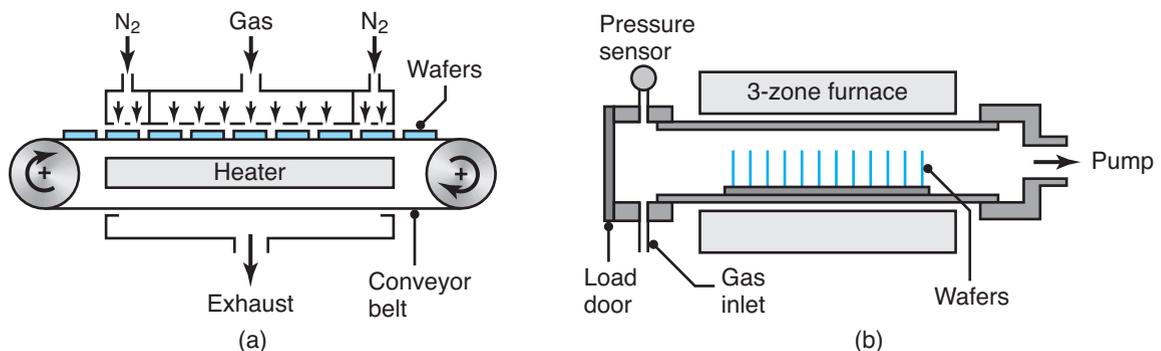


FIGURE 28.8 Schematic diagrams of a (a) continuous atmospheric-pressure CVD reactor and (b) low-pressure CVD. *Source:* After S.M. Sze.

technology; however, the MBE process has relatively low growth rates as compared to other conventional film-deposition techniques.

28.6 Oxidation

The term *oxidation* refers to the growth of an oxide layer as a result of the reaction of oxygen with the substrate material. Oxide films also can be formed by the previously described deposition techniques. Thermally grown oxides, described in this section, display a higher level of purity than deposited oxides, because they are grown directly from the high-quality substrate. However, methods of deposition must be used if the composition of the desired film is different from that of the substrate material.

Silicon dioxide is the most widely used oxide in IC technology today, and its excellent characteristics are one of the major reasons for the widespread use of silicon. Aside from its effectiveness in dopant masking and device isolation, silicon dioxide's most critical role is that of the *gate oxide* material. Silicon surfaces have an extremely high affinity for oxygen, and thus a freshly sawed slice of silicon will quickly grow a native oxide of 30–40 Å thickness.

- **Dry oxidation** is a relatively simple process, and is accomplished by elevating the substrate temperature, typically to about 750°–1100°C (1380°–2020°F), in an oxygen-rich environment. As a layer of oxide forms, the oxidizing agents must be able to pass through the oxide and reach the silicon surface, where the actual reaction takes place. Thus, an oxide layer does not continue to grow on top of itself, but rather, it grows from the silicon surface outward. Some of the silicon substrate is consumed in the oxidation process (Fig. 28.9).

The ratio of oxide thickness to the amount of silicon consumed is found to be 1:0.44; thus, to obtain an oxide layer 1000 Å thick, approximately 440 Å of silicon will be consumed. This requirement does not present a problem, as substrates always are grown sufficiently thick. One important effect of the consumption of silicon is the rearrangement of dopants in the substrate near the interface. Because different impurities have different segregation coefficients or mobilities in silicon dioxide, some dopants become depleted away from the oxide interface while others pile up there. Consequently, processing parameters must be properly adjusted to compensate for this effect.

- **Wet oxidation** utilizes a water-vapor atmosphere as the agent. This method results in a considerably higher growth rate than that of dry oxidation, but it suffers from a lower oxide density and, therefore, a lower dielectric strength. The common practice in industry is to combine both dry and wet oxidation methods, by growing an oxide in a three-part layer: dry–wet–dry. This approach combines the advantages of wet oxidation's much higher growth rate and dry oxidation's high quality.

The two oxidation methods described are useful primarily for coating the entire silicon surface with oxide; however, it also may be necessary to oxidize only certain portions of the surface. The procedure of oxidizing only certain areas is called **selective oxidation**, and uses silicon nitride, which inhibits the passage of oxygen and water vapor. Thus, by covering certain areas with silicon nitride, the silicon under these areas remains unaffected while the uncovered areas are oxidized.

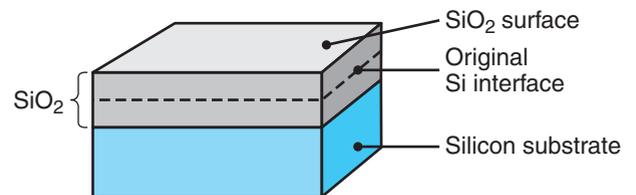


FIGURE 28.9 Growth of silicon dioxide, showing consumption of silicon. *Source:* After S.M. Sze.

TABLE 28.1

General Characteristics of Lithography Techniques		
Method	Wavelength (nm)	Finest feature size (nm)
Ultraviolet (photolithography)	365	350
Deep UV	248	250
Extreme UV	10–20	30–100
X-ray	0.01–1	20–100
Electron beam	—	80
Immersion	193	11

Source: After P.K. Wright.

28.7 Lithography

Lithography is the process by which the geometric patterns that define devices are transferred to the substrate surface. A summary of lithographic techniques is given in Table 28.1, and a comparison of the basic lithography methods is shown in Fig. 28.10. The most common technique used today is **photolithography**, and most IC applications can be manufactured successfully with photolithography. *Electron-beam* and *X-ray lithography* are of great interest, because of their ability to transfer patterns with higher resolution, a necessary feature for the increased miniaturization of integrated circuits.

Photolithography. Photolithography uses a **reticle**, also called a **mask** or **photomask**, which is a glass or quartz plate with a pattern of the chip deposited onto it with a chromium film. The reticle image can be the same size as the desired structure on the chip, but it is often an enlarged image, usually 4× to 20× larger, although 10× magnification is the most common. The enlarged images

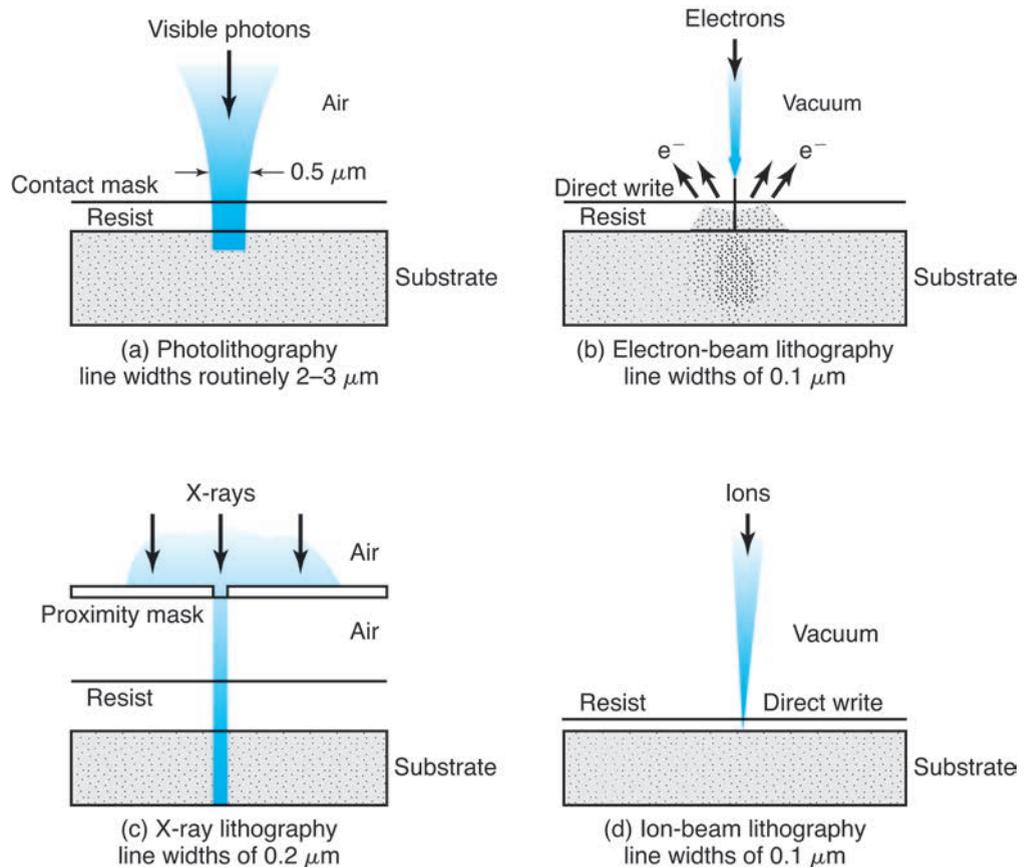


FIGURE 28.10 Comparison of lithography techniques; note that (a) and (c) involve masking to achieve pattern transfer, while (b) and (d) scribe the pattern without a mask, known as direct writing.

are then focused onto a wafer through a lens system, an operation that is referred to as *reduction lithography*.

In current practice, the lithographic process is applied to each microelectronic circuit as many as 25 times, each time using a different reticle to define the different areas of the working devices. Typically designed at several thousand times their final size, reticle patterns undergo a series of reductions before being applied permanently to a defect-free quartz plate. Computer-aided design (CAD; see Section 38.4) has had a major impact on reticle design and generation.

Cleanliness is especially important in lithography, and manufacturers now use robotics and specialized wafer-handling equipment in order to minimize contamination from dust and dirt. Once the film deposition process is completed and the desired reticle patterns have been generated, the wafer is cleaned and coated with a **photoresist (PR)**, an organic polymer.

A photoresist consists of three principal components:

1. A polymer that changes its structure when exposed to radiation
2. A sensitizer that controls the reactions in the polymer
3. A solvent, to deliver the polymer in liquid form

Photoresist layers $0.5\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ ($20\text{--}100\ \mu\text{in.}$) thick are produced by applying the photoresist to the substrate and then spinning it, at several thousand rpm, for 30 or 60 s to give uniform coverage (Fig. 28.11).

The next step in photolithography is **prebaking** the wafer, to remove the solvent from the photoresist and harden it. This step is carried out on a hot plate, heated to around 100°C . The pattern is transferred to the wafer through *stepper* or *step-and-scan* systems. With wafer steppers (Fig. 28.12a), the full image is exposed in one flash, and the reticle pattern is then refocused onto another adjacent section of the wafer. With step-and-scan systems (Fig. 28.12b), the exposing light source is focused into a line, and the reticle and wafer are translated simultaneously in opposite directions to transfer the pattern.

The wafer must be aligned carefully under the desired reticle. In this crucial step, called **registration**, the reticle must be aligned correctly with the previous layer on the wafer. Once the reticle is aligned, it is subjected to ultraviolet (UV) radiation. Upon development and removal of the exposed photoresist, a duplicate of the reticle

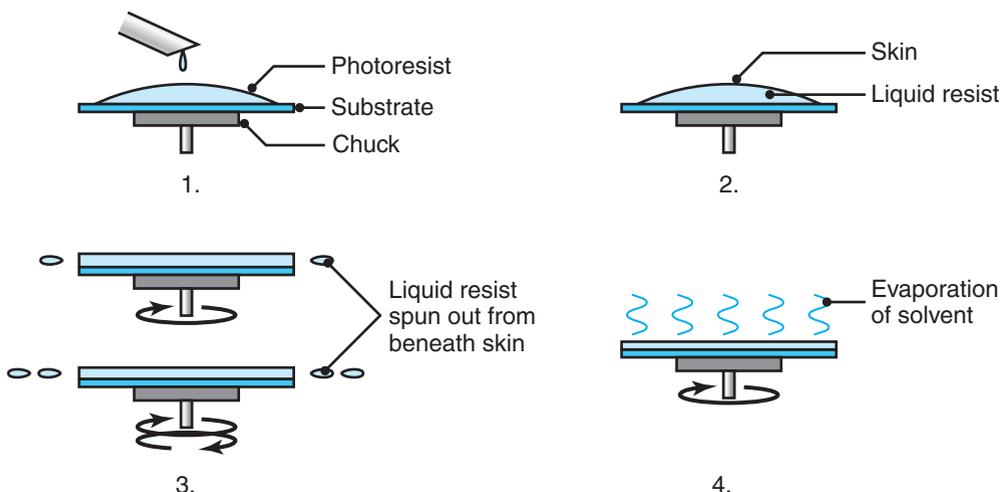


FIGURE 28.11 Spinning of an organic coating on a wafer.

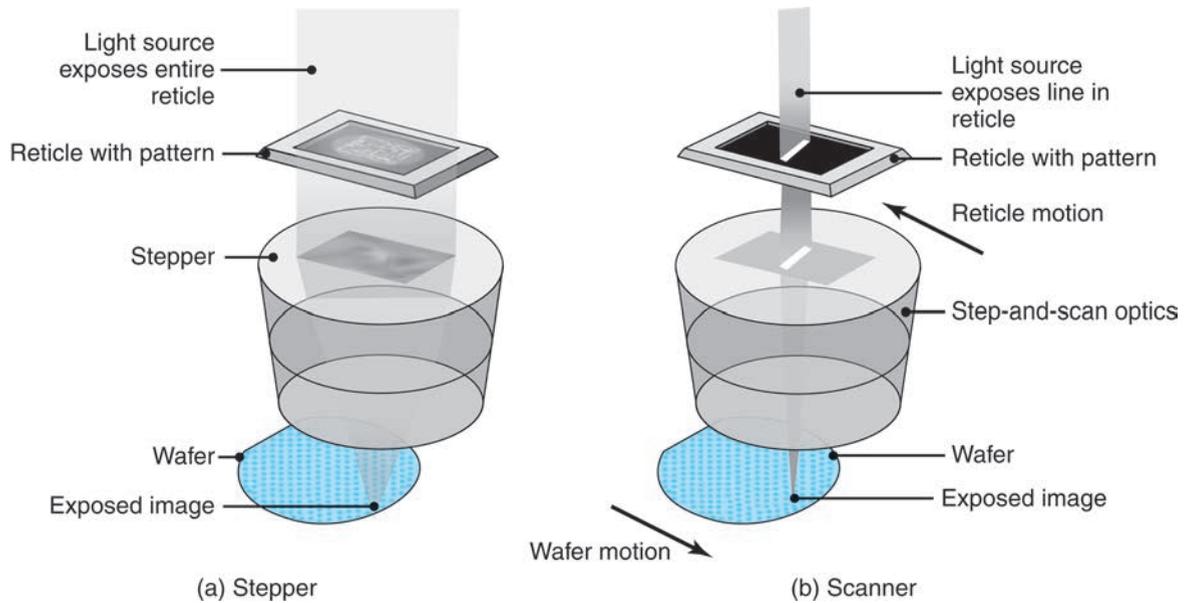


FIGURE 28.12 Schematic illustration of (a) wafer stepper technique for pattern transfer and (b) wafer step-and-scan technique.

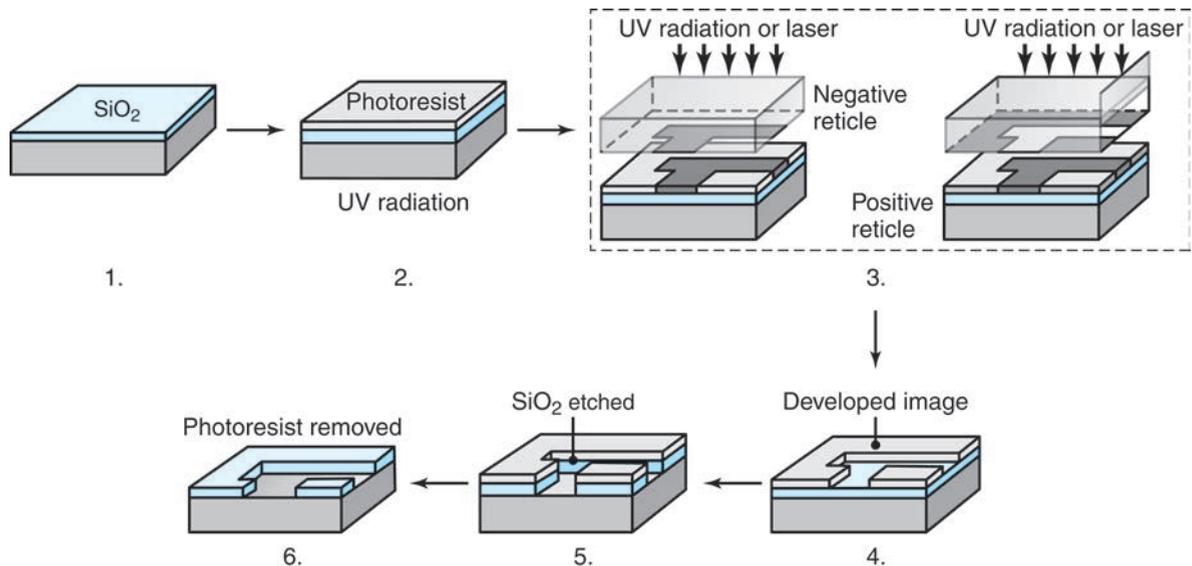


FIGURE 28.13 Pattern transfer by photolithography; note that the reticle in Step 3 can be a positive or negative image of the pattern.

pattern will appear in the photoresist layer. As seen in Fig. 28.13, the reticle can be a negative image or a positive image of the desired pattern. A positive reticle uses the UV radiation to break down the chains in the organic film, so that these films are removed preferentially by the developer. Positive masking is more common than negative masking because, with negative masking, the photoresist can swell and distort, thus making it unsuitable for small features. Newer negative photoresist materials do not have this problem.

Following the exposure and development sequence, **postbaking** the wafer drives off the solvent, and toughens and improves the adhesion of the remaining resist. In addition, a deep UV treatment (thereby baking the wafer to about 150°–200°C in ultraviolet light) can be used to further strengthen the resist against high-energy implants and dry etches. The underlying film not covered by the photoresist is then etched away (Section 28.8) or implanted (Section 28.9).

Following lithography, the developed photoresist must be removed, in a process called **stripping**. In *wet stripping*, the photoresist is dissolved by such solutions as acetone or strong acids. In this method, the solutions tend to lose potency in use. *Dry stripping* involves exposing the photoresist to an oxygen plasma, referred to as **ashing**. Dry stripping has become more common, because it (a) does not involve the disposal of consumed hazardous chemicals and (b) is easier to control and can result in exceptional surfaces.

One of the major issues in lithography is **line width**, which is the width of the smallest feature imprintable on the silicon surface, and is called **critical dimension** (CD). As circuit densities have escalated over the years, device sizes and features have become smaller and smaller; today, commercially feasible minimum critical dimension is 32 nm, with a major trend to obtain 16 nm or even smaller.

Because pattern resolution and device miniaturization have been limited by the wavelength of the radiation source used, the need has arisen to move to wavelengths shorter than those in the UV range, such as deep UV wavelengths, extreme UV wavelengths, electron beams, and X-rays. In these technologies, the photoresist is replaced by a similar resist that is sensitive to a specific range of shorter wavelengths.

Pitch Splitting. Multiexposure techniques have been developed to obtain higher resolution images than can be attained through conventional single-exposure lithography, and have been applied for sub-32 nm feature development. *Pitch splitting* is shown in Fig. 28.14, using conventional lithography in multiple stages. Recognizing that the spacing between features is the limiting dimension, pitch splitting involves breaking up the desired pattern into two complimentary portions and creating corresponding masks. By using two imaging steps, features can be developed in the substrate with twice the resolution of a single imaging step.

There are two forms of pitch splitting. In **double exposure** (DE), a mask exposes some of the desired trenches or regions in the photoresist, then a second mask is used to expose the remaining features (Fig. 28.14a). The photoresist is then exposed and the substrate is etched. **Double patterning** (DP) involves two sequential lithography and etch steps, so that it is sometimes referred to as the *LELE* (lithography-etch-lithography-etch) *process*.

Immersion Lithography. The resolution of lithography systems can be increased by inserting a fluid with a high refractive index between the final lens and the wafer, an approach called *immersion lithography*. Water has been mainly used to date, and has been the main approach used to attain feature sizes below 45 nm. Fluids with a refractive index higher than that of water also are being investigated to increase the resolutions of immersion lithography.

Immersion lithography requires careful process controls, especially thermal controls, since any bubbles that develop in the water will result in defects due to distortion of the light source.

Extreme Ultraviolet Lithography. The pattern resolution in photolithography and immersion lithography is ultimately limited by light diffraction. One of the means of reducing the effects of diffraction is to use ever shorter wavelengths. *Extreme ultraviolet lithography* (EUV) uses light at a wavelength of 13 nm, in order to obtain

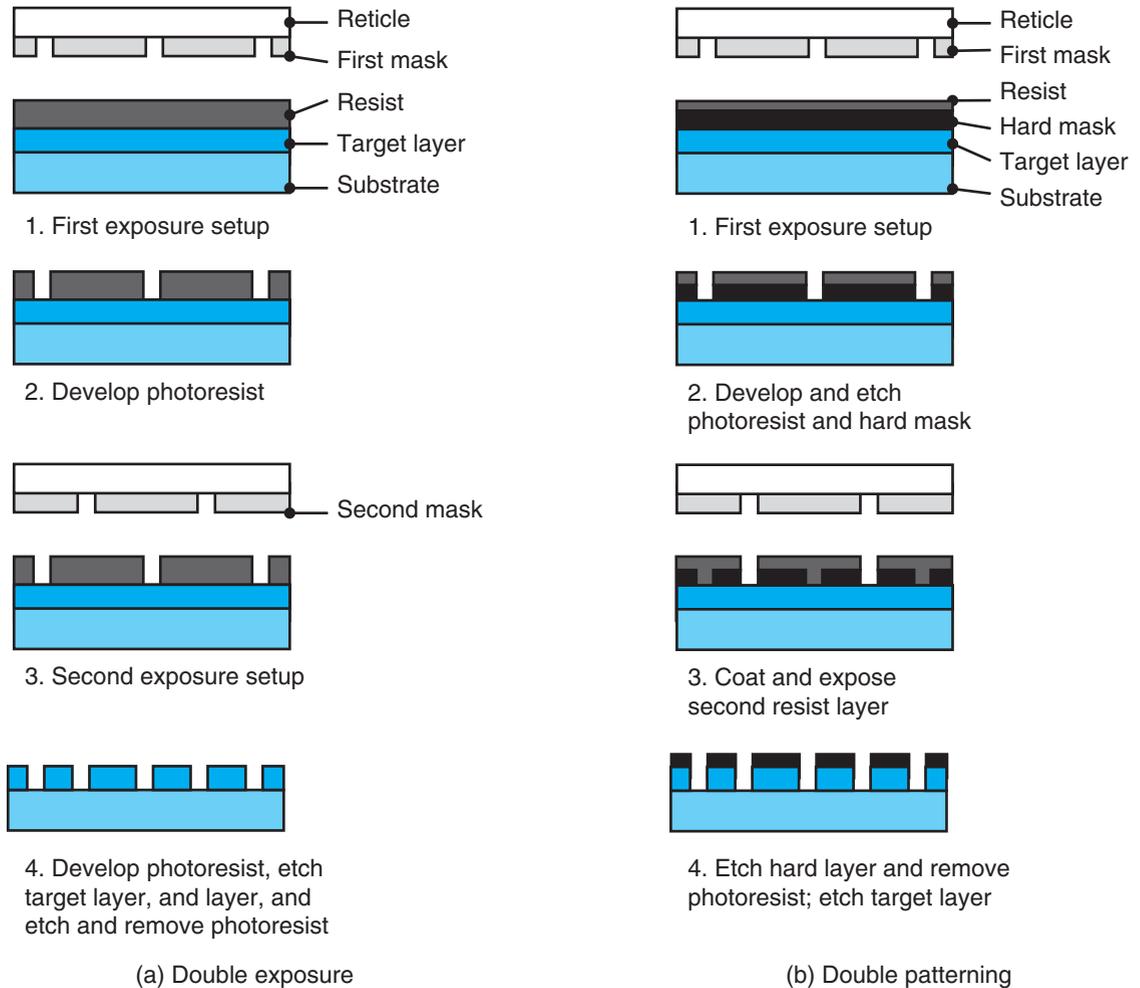


FIGURE 28.14 Pitch splitting lithography. (a) Double exposure (DE) process and (b) double patterning (DP) process, also known as the LELE (lithography-etch-lithography-etch) process.

features commonly in the range from 30 to 100 nm, but is expected to be useful for sub-25 nm features. Because glass lenses absorb some EUV light, the waves are focused through highly reflective molybdenum–silicon mirrors through the mask to the wafer surface.

X-Ray Lithography. Although photolithography is the most widely used lithography technique, it has fundamental resolution limitations associated with light diffraction. *X-ray lithography* is superior to photolithography, because of the shorter wavelength of the radiation and its very large depth of focus. These characteristics allow much finer patterns to be resolved, and make X-ray lithography far less susceptible to dust than photolithography. Moreover, the *aspect ratio* (defined as the ratio of depth to lateral dimension) can be higher than 100, whereas it is limited to around 10 with photolithography. However, to achieve this benefit, synchrotron radiation is required, which is expensive and available at only a few research laboratories.

Given the large capital investment required for a manufacturing facility, industry has preferred to refine and improve optical lithography, instead of investing new

capital into X-ray-based production. Currently, X-ray lithography is not widespread, although the LIGA process, described in Section 29.3, fully exploits the benefits of this technique.

Electron-beam and Ion-beam Lithography. Like X-ray lithography, *electron-beam* (e-beam) and *ion-beam* lithography are superior to photolithography, in terms of attainable resolutions. These two methods involve high current density in narrow electron or ion beams (known as *pencil sources*), which scan a pattern one pixel at a time onto a wafer. The masking is done by controlling the point-by-point transfer of the stored pattern, called *direct writing*, using software. These techniques have the advantages of accurate control of exposure over small areas of the wafer, large depth of focus, and low defect densities. Resolutions are limited to about 10 nm, because of electron scatter, although 2-nm resolutions have been reported for some materials.

It should be noted that the scan time significantly increases as the resolution improves, because more highly focused beams are required. The main drawback of these two techniques is that electron and ion beams have to be maintained in a vacuum, thus significantly increasing equipment complexity and production time. Moreover, the scan time for a wafer is much longer than that for other lithographic methods.

SCALPEL. In the SCALPEL (*scattering with angular limitation projection electron-beam lithography*) process (Fig. 28.15), a mask is first produced from about a $0.1\text{-}\mu\text{m}$ -thick membrane of silicon nitride, and then patterned with an approximately 50-nm-thick coating of tungsten. High-energy electrons pass through both the silicon nitride and the tungsten, but the tungsten scatters the electrons widely, whereas

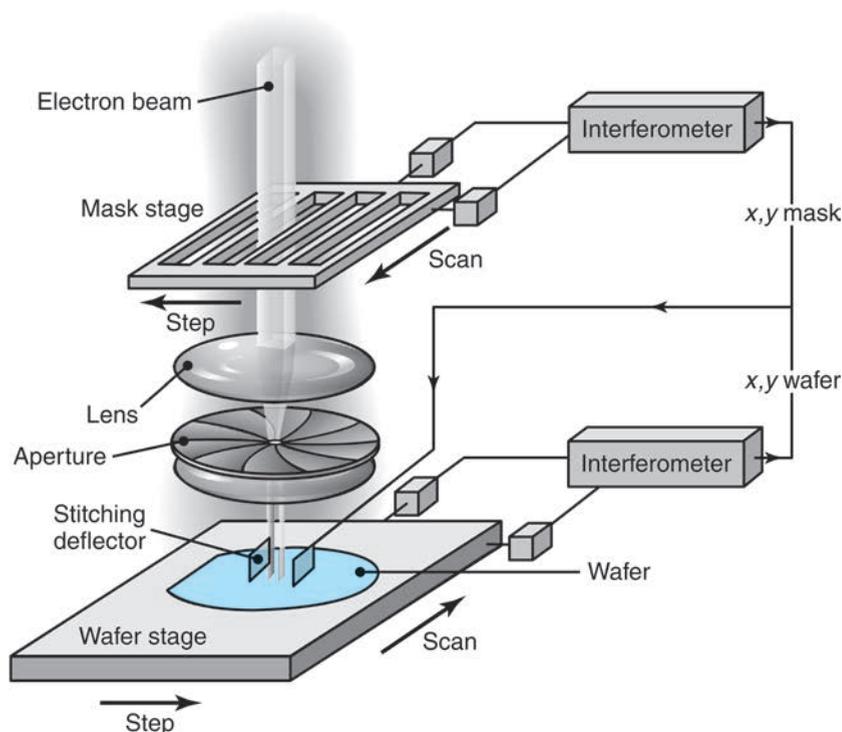


FIGURE 28.15 Schematic illustration of the SCALPEL process.

the silicon nitride results in very little scattering. An aperture blocks the scattered electrons, resulting in a high-quality image at the wafer.

The limitation to the SCALPEL process is the small-sized masks that are currently in use, but the process has high potential. Perhaps its most significant advantage is that energy does not need to be absorbed by the reticle; instead, it is blocked by the aperture, which is not as fragile or expensive as the reticle.

EXAMPLE 28.1 Moore's Law

G. Moore, an inventor of the integrated circuit and past chairman of Intel Corporation, observed in 1965 that the surface area of a single transistor is reduced by 50% every 12 months. In 1975, he revised this estimate to every two years; the resulting estimate is widely known as Moore's law, and it has been remarkably accurate. Figure 28.16 shows the historical progression of feature size in *dynamic random access memory* (DRAM) bits, as well as projected future developments. Looking ahead, however, one can note that there are some major impediments to the continued reliability of Moore's law. Among the more important ones are:

- To produce ever smaller features in a transistor requires that even more stringent manufacturing tolerances be achieved. For example, 180-nm line widths require ± 14 -nm dimensional tolerances, whereas 50-nm line widths require ± 4 nm. Either requirement is especially problematic for the metal connection lines within the transistor.
- Smaller transistors can operate only if the dopant concentration is increased. Above a certain limit, however, the doping atoms cluster together. The result is that *p*-type and *n*-type silicon cannot be produced reliably at small length scales.
- The gate-switching energy of transistors has not been reduced at the same rate as their size; the result is increased power consumption in integrated circuits. This effect has a serious consequence, in that it is very difficult to dissipate the heat produced.
- At smaller length scales, microprocessors require lower voltages for proper operation. However, since the power consumption is still relatively high, very large currents are needed between the power-conversion devices and the central-processing units of modern microprocessors. These large currents result in resistive heating, thus compounding the heat-extraction problems.

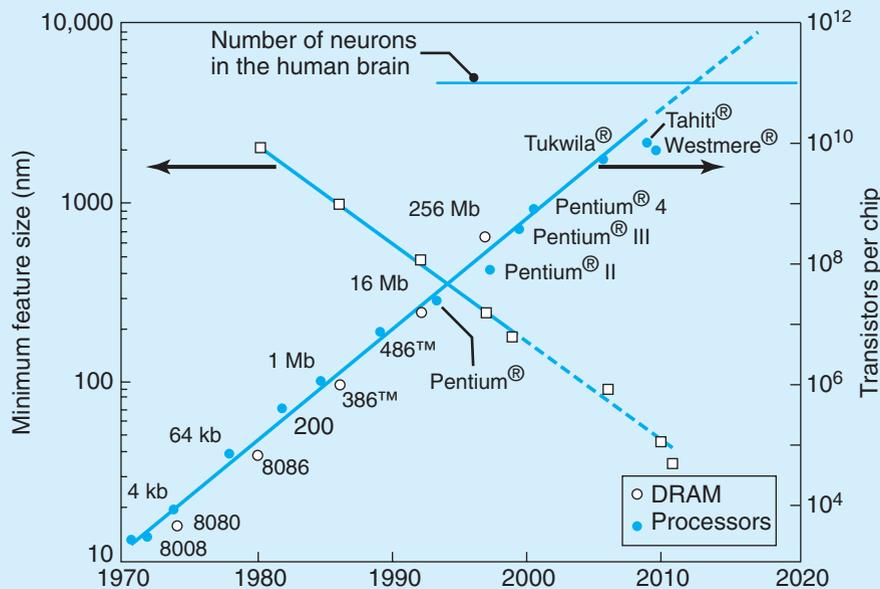


FIGURE 28.16 Illustration of Moore's law.

Much research continues to be directed toward overcoming these limitations. Moore's law was intended as a prediction of the short-term future of the semiconductor industry, and was put forward at a time when photolithography was the only

option. During the four decades since the law was first stated, researchers often have identified seemingly insurmountable problems which, in turn, have been overcome.

Soft Lithography. *Soft lithography* refers to several processes for pattern transfer, all of which require that a master mold be created by one of the standard lithography techniques described above. The master mold is then used to produce an elastomeric pattern, or stamp, as shown in Fig. 28.17. An elastomer that has commonly been used for the stamp is silicone rubber (polydimethylsiloxane, PDMS), because it is chemically inert, is not hygroscopic (it does not swell due to humidity), and has good thermal stability, strength, durability, and surface properties.

Several PDMS stamps can be produced using the same pattern, and each stamp can be used several times. Some of the common soft lithography processes are:

1. **Microcontact printing (μ CP).** In *microcontact printing*, the PDMS stamp is coated with an “ink” and then pressed against a surface. The peaks of the pattern are in contact with the opposing surface, and a thin layer of the ink is transferred, often only one molecule thick (called a *self-assembled monolayer* or *boundary film*; see Section 33.6). This film can serve as a mask for selective wet etching, described below, or it can be used to impart a desired chemistry onto the surface.
2. **Microtransfer molding (μ TM).** In this process, shown in Fig. 28.18a, the recesses in the PDMS mold are filled with a liquid polymer precursor, and then pressed against a surface. After the polymer has cured, the mold is peeled off, leaving behind a pattern suitable for further processing.
3. **Micromolding in capillaries.** Called MIMIC, in this technique (Fig. 28.18b) the PDMS stamp pattern consists of channels that use capillary action to wick a liquid into the stamp, either from the side of the stamp or from reservoirs within the stamp itself. The liquid can be a thermosetting polymer, a ceramic sol gel, or suspensions of solids within liquid solvents. Good pattern replication can be

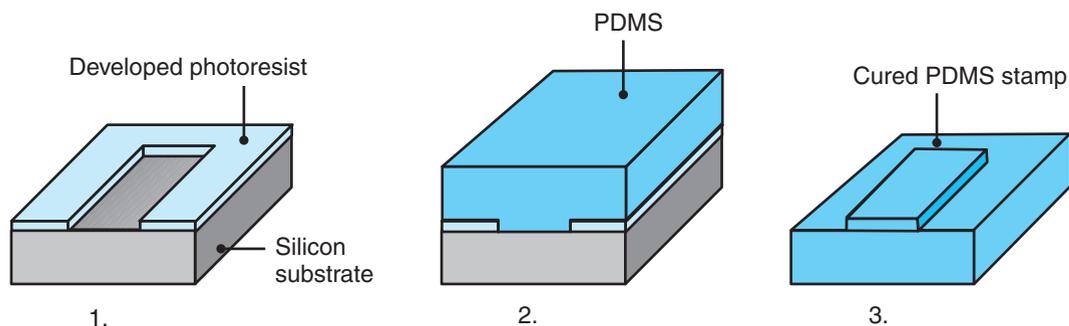


FIGURE 28.17 Production of a polydimethylsiloxane (PDMS) mold for soft lithography. 1. A developed photoresist is produced through standard lithography (see Fig. 28.13). 2. A PDMS stamp is cast over the photoresist. 3. The PDMS stamp is peeled off the substrate to produce a stamp. The stamp shown has been rotated to emphasize the replication of surface features; the master pattern can be used several times. *Source:* Based on Y. Xia and G.M. Whitesides.

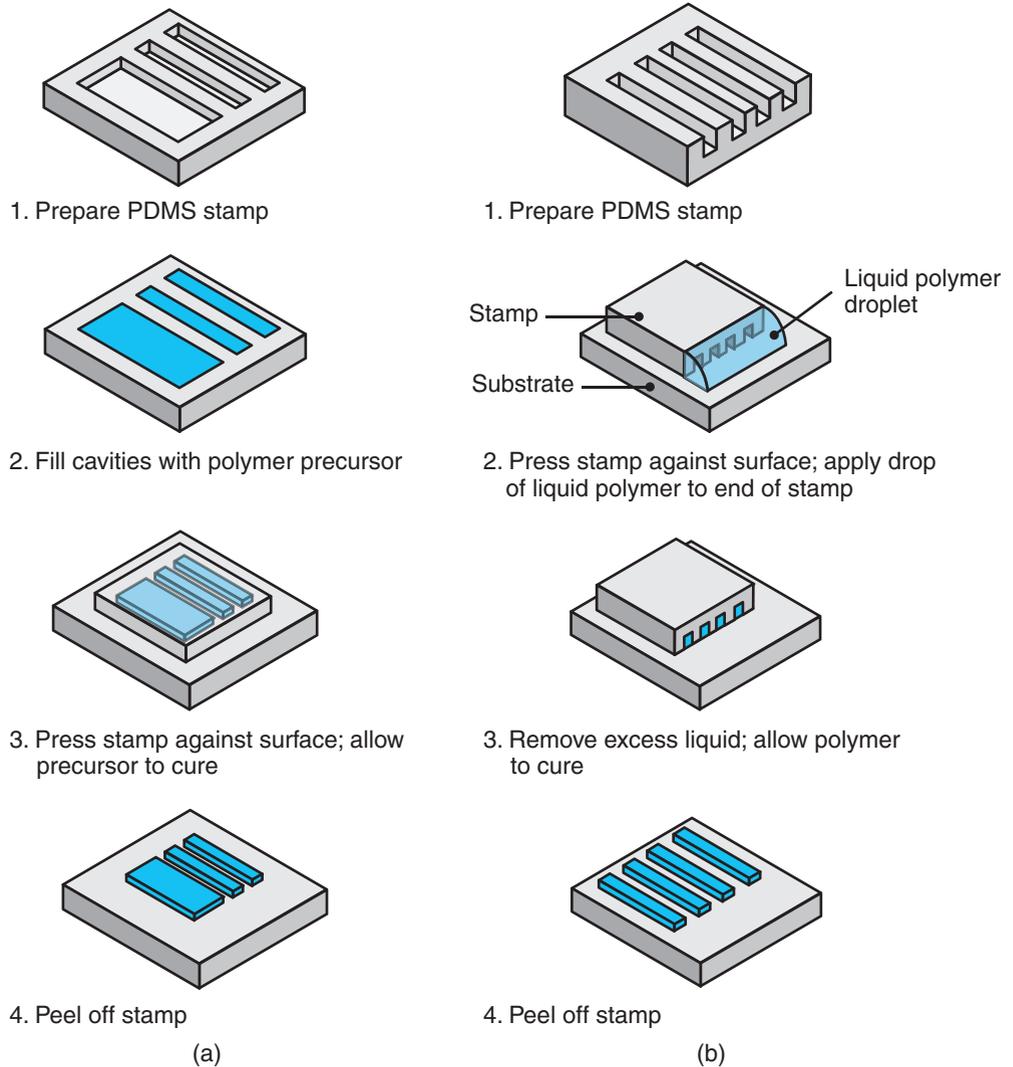


FIGURE 28.18 Soft lithography techniques. (a) Microtransfer molding (μ TM) and (b) micro-molding in capillaries (MIMIC). *Source:* After Y. Xia and G.M. Whitesides.

obtained, as long as the channel aspect ratio is moderate and the actual channel dimensions allow fluid flow. The dimensions required depend on the liquid used. The MIMIC process has been used to produce all-polymer field-effect transistors and diodes, and has various applications in sensors (Section 37.7).

28.8 Etching

Etching is the process by which entire films or particular sections of films are removed. One of the key criteria in this process is **selectivity**, that is, the ability to etch one material without etching another. In silicon technology, an etching process must etch the silicon-dioxide layer effectively, with minimal removal of either the underlying silicon or the resist material. In addition, polysilicon and metals must be etched into high-resolution lines with vertical wall profiles, and with minimal removal of either the underlying insulating film or the photoresist. Typical etch rates range from hundreds

TABLE 28.2

General Characteristics of Silicon Etching Operations						
Wet etching	Temperature (°C)	Etch rate ($\mu\text{m}/\text{min}$)	{111}/{100} selectivity	Nitride etch rate (nm/min)	SiO ₂ etch rate (nm/min)	p ⁺⁺ etch stop
Wet etching						
HF:HNO ₃ :CH ₃ COOH	25	1–20	—	Low	10–30	No
KOH	70–90	0.5–2	100:1	<1	10	Yes
Ethylene-diamine pyrocatechol (EDP)	115	0.75	35:1	0.1	0.2	Yes
N(CH ₃) ₄ OH (TMAH)	90	0.5–1.5	50:1	<0.1	<0.1	Yes
Dry (plasma) etching						
SF ₆	0–100	0.1–0.5	—	200	10	No
SF ₆ /C ₄ F ₈ (DRIE)	20–80	1–3	—	200	10	No

Source: Based on Kovacs, G.T.A., Maluf, N.I., and Peterson, K.E., “Bulk micromachining of silicon” in *Integrated Sensors, Microactuators and Microsystems (MEMS)*, pp. 1536–1551, K.D. Wise (ed), Proceedings of the IEEE, v. 86, No. 8, August 1998.

to several thousands of angstroms per minute, and selectivities can range from 1:1 to 100:1. A summary of etching processes and etchants is given in Tables 28.2 and 28.3.

28.8.1 Wet Etching

Wet etching involves immersing the wafers in a liquid solution, usually acidic. A primary feature of most wet-etching operations is that they are *isotropic*; that is, they etch in all directions of the workpiece at the same rate. Isotropy results in *undercuts* beneath the mask material (see, for example, Figs. 27.3b and 28.19a), and thus limits the resolution of geometric features in the substrate.

Effective etching requires the following conditions:

1. Etchant transport to the surface
2. A chemical reaction
3. Transport of reaction products away from the surface
4. Ability to stop the etching process rapidly, known as *etch stop*, in order to obtain superior pattern transfer, usually by using an underlying layer with high selectivity

If the first or third condition listed above limits the speed of the process, agitation or stirring of the etchant can be employed to increase etching rates. If the second condition limits the speed of the process, the etching rate will strongly depend on temperature, etching material, and solution composition. Reliable etching thus requires both proper temperature control and repeatable stirring capability.

Isotropic Etchants. These etchants are widely used for:

- Removing damaged surfaces
- Rounding sharply etched corners, to avoid stress concentrations
- Reducing roughness developed after anisotropic etching
- Creating structures in single-crystal slices
- Evaluating defects

Fabrication of microelectronic devices as well as microelectromechanical systems, described in Chapter 29, requires the precise machining of structures, done through masking. With isotropic etchants, however, masking can be a challenge, because the strong acids (a) etch aggressively at a rate of up to 50 $\mu\text{m}/\text{min}$, with an etchant of 66% HNO₃ and 34% HF, although etch rates of 0.1–1 $\mu\text{m}/\text{s}$ are more typical,



Video Solution 28.1 Wet Etching

TABLE 28.3

Comparison of Etch Rates for Selected Etchants and Target Materials

Etchant	Target material	Etch rate (nm/min) ^a							
		Polysilicon # ⁺	Polysilicon, undoped	Silicon dioxide	Silicon nitride	Phospho-silicate glass, annealed	Aluminum	Titanium	Photoresist (OCG-820PR)
Wet etchants									
Concentrated HF (49%)	Silicon oxides	0	—	2300	14	3600	4.2	>1000	0
25:1 HF:H ₂ O	Silicon oxides	0	0	9.7	0.6	150	—	—	0
5:1 BHF ^b	Silicon oxides	9	2	100	0.9	440	140	>1000	0
Silicon etchant (126 HNO ₃ :60 H ₂ O:5 NH ₄ F)	Silicon	310	100	9	0.2	170	400	300	0
Aluminum etchant (16 H ₃ PO ₄ :1 HNO ₃ :1 HAc:2 H ₂)	Aluminum	<1	<1	0	0	<1	660	0	0
Titanium etchant (20 H ₂ O:1 H ₂ O ₂ :1 HF)	Titanium	1.2	—	12	0.8	210	>10	880	0
Piranha (50 H ₂ SO ₄ :1 H ₂ O ₂)	Metals and organics (cleaning off)	0	0	0	0	0	180	240	>10
Acetone (CH ₃ COOH)	Photoresist	0	0	0	0	0	0	0	>4000
Dry Etchants									
CF ₄ + CHF ₃ + He, 450 W	Silicon oxides	190	210	470	180	620	—	>1000	220
SF ₆ + He, 100 W	Silicon nitrides	73	67	31	82	61	—	>1000	69
SF ₆ , 12.5 W	Thin silicon nitrides	170	280	110	280	140	—	>1000	310
O ₂ , 400 W	Ashing photoresist	0	0	0	0	0	0	0	340

Notes:

^aResults are for fresh solutions at room temperature, unless noted. Actual etch rates will vary with temperature and prior use of solution, area of exposure of film, other materials present, film impurities, and microstructure.

^bBuffered hydrofluoric acid (33% NH₄F and 8.3% HF by weight).

Source: After K. Williams and R. Muller.

(b) produce rounded cavities, and (c) are etch rate that is highly sensitive to agitation, thus lateral and vertical features are difficult to control. Because the size of the features in an integrated circuit determines its performance, there is a strong need to produce extremely small and well-defined structures. Such small features cannot be attained through isotropic etching, because of the poor definition resulting from undercutting of masks.

Anisotropic Etching. This situation occurs when etching is strongly dependent on compositional or structural variations in the material. There are two basic types of anisotropic etching: *orientation-dependent etching* (ODE) and *vertical etching*. Orientation-dependent etching commonly occurs in a single crystal, when etching takes place at different rates in different directions, as shown in Fig. 28.19b. Most vertical etching is done with dry plasmas, as described later.

Anisotropic etchants produce geometric shapes, with walls that are defined by the crystallographic planes that resist the etchants. For example, Fig. 28.20 shows the vertical etch rate for silicon as a function of temperature. Note that the etching rate is more than one order of magnitude lower in the [111] crystal direction than in the other directions; therefore, well-defined walls can be obtained along the [111] crystal direction.

The **anisotropy ratio** for etching is defined by

$$AR = \frac{E_1}{E_2}, \quad (28.1)$$

where E is the etch rate in the crystallographic direction of interest, and the two subscripts refer to two directions for the materials of interest. The anisotropy ratio is unity for isotropic etchants, but can be as high as 400/200/1 for (110)/(100)/(111) silicon. The {111} planes always etch at the lowest rate, but the {100} and {110} planes can be controlled through etchant chemistry.

Masking is also a concern in anisotropic etching, but for different reasons than those for isotropic etching. Anisotropic etching is slow, typically $3 \mu\text{m}/\text{min}$, with anisotropic etching through a wafer taking as much as several hours. Silicon oxide may etch too rapidly to be used as a mask, hence a high-density silicon nitride mask may be needed.

Often, it is important to rapidly halt the etching process, especially when thin membranes are to be manufactured or features with very precise thickness control are required. Conceptually, rapid halting can be accomplished by removing the wafer from the etching solution. However, etching depends to a great extent on the ability to circulate fresh etchants to the desired locations. Since the circulation varies across a wafer's surface, this strategy for halting the etching process would lead to large variations in the etched depth.

The most common approach to obtain uniform feature sizes across a wafer is to use a boron etch stop (Fig. 28.21), whereby a boron layer is diffused or implanted into the silicon. Examples of common etch stops are the placement of a boron-doped layer beneath silicon or the placement of silicon dioxide (SiO_2) beneath silicon nitride (Si_3N_4). Because anisotropic etchants do not attack boron-doped silicon as aggressively as they do undoped silicon, surface features or membranes can be created by **back etching**.

Several etchant formulations have been developed, including hydrofluoric acid, phosphoric acid, mixtures of nitric acid and hydrofluoric acid, potassium hydrochloride, and mixtures of phosphoric acid, nitric acid, acetic acid, and water. Wafer *cleaning* is done with a solution consisting of sulfuric acid and peroxide, called *Piranha solution*, a trade name. Photoresist can be removed with these solutions, although acetone is commonly used for this purpose.

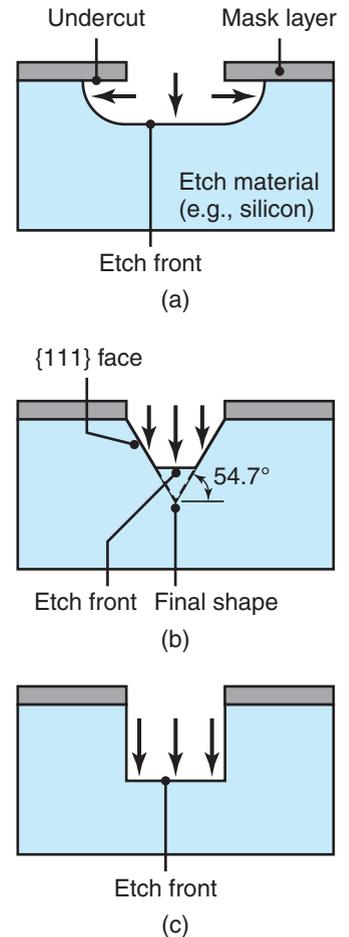


FIGURE 28.19 Etching directionality. (a) Isotropic etching; etch proceeds vertically and horizontally at approximately the same rate, with significant mask undercut. (b) Orientation-dependent etching (ODE); etch proceeds vertically, terminating on {111} crystal planes with little mask undercut. (c) Vertical etching; etch proceeds vertically with little mask undercut. *Source:* After K. Williams and R. Muller.

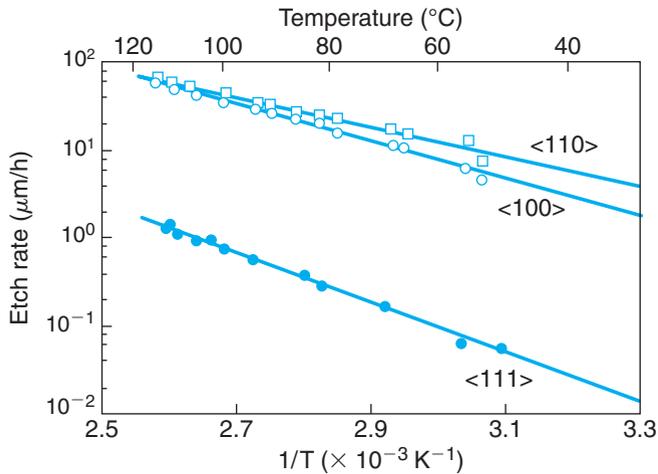


FIGURE 28.20 Etch rates of silicon in different crystallographic orientations, using ethylene-diamine/pyrocatechol-in-water as the solution. *Source:* After H. Seidel.

28.8.2 Dry Etching

Integrated circuits are now etched exclusively by *dry etching*, which involves the use of chemical reactants in a low-pressure system. In contrast to wet etching, dry etching can have a high degree of directionality, resulting in highly anisotropic etching profiles (Fig. 28.19c). Also, the dry-etching process requires only small amounts of the reactant gases, whereas the solutions used in wet etching have to be refreshed periodically.

Dry etching usually involves a plasma or discharge in areas of high electric and magnetic fields; any gases that are present are dissociated to form ions, photons, electrons, or highly reactive molecules. Table 28.2 lists some of the more common dry etchants, their target materials, and typical etch rates. There are several specialized dry-etching techniques.

Sputter Etching. This process removes material by bombarding the surface with noble gas ions, usually

Ar^+ . The gas is ionized in the presence of a cathode and an anode (Fig. 28.22). If a silicon wafer is the target, the momentum transfer associated with the bombardment of atoms causes bond breakage and material to be ejected or sputtered. If the silicon chip is the substrate, then the material in the target is deposited onto the silicon, after it has been sputtered by the ionized gas.

The major concerns in sputter etching are:

- The ejected material can be redeposited onto the target, especially with large aspect ratios
- Sputtering can cause damage or excessive erosion of the material
- Sputter etching is not material selective, and because most materials sputter at about the same rate, masking is difficult
- The sputter etching process is slow, with etch rates limited to tens of nm/min
- The photoresist is difficult to remove

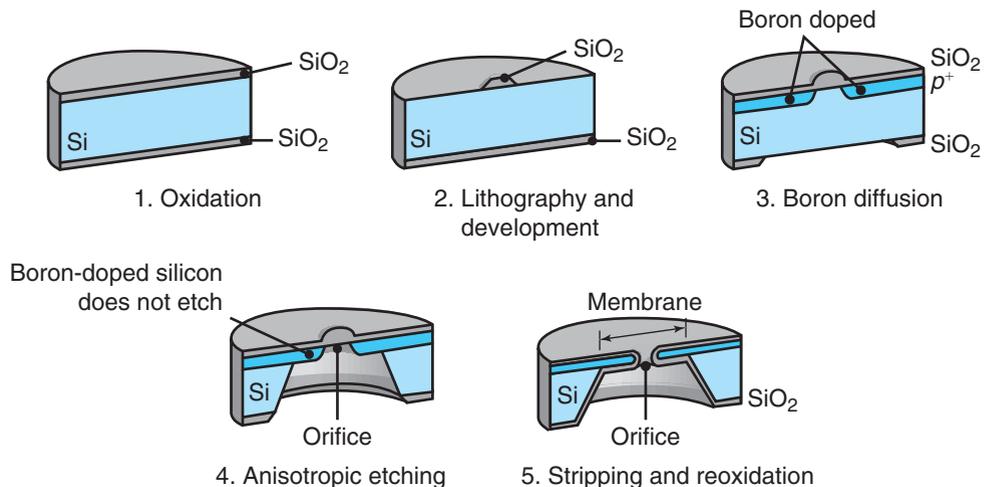


FIGURE 28.21 Application of a boron etch stop and back etching to form a membrane and orifice. *Source:* Based on I. Brodie and J.J. Murray.

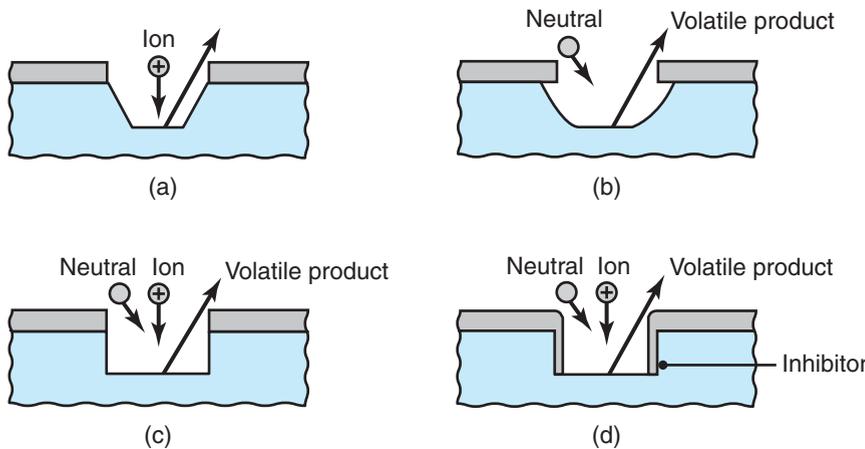


FIGURE 28.22 Machining profiles associated with different dry-etching techniques: (a) sputtering; (b) chemical; (c) ion-enhanced energetic; and (d) ion-enhanced inhibitor. *Source:* After M. Madou.

Reactive Plasma Etching. Also referred to as **dry chemical etching**, this process involves chlorine or fluorine ions (generated by RF excitation), and other molecular species, that diffuse into and chemically react with the substrate. As a result, a volatile compound is formed, which is then removed by a vacuum system. The mechanism of reactive plasma etching is illustrated in Fig. 28.23:

1. A reactive species, such as CF_4 , is first produced, and it dissociates upon impact with energetic electrons, to produce fluorine atoms.
2. The reactive species then bombard and diffuse into the surface.
3. The reactive species chemically reacts to form a volatile compound.
4. The reactant desorbs from the surface.
5. It then diffuses into the bulk gas, where it is removed by a vacuum system.

Some reactants polymerize on the surface, thus requiring additional removal of material, either with oxygen in the plasma reactor or by an external *ashing* operation (see *dry stripping* in Section 28.7). The electrical charge of the reactive species is not high enough to cause damage through impact on the surface, hence no sputtering occurs; thus, the etching is isotropic and undercutting of the mask takes place (Fig. 28.19a).

Physical–chemical Etching. Processes such as *reactive ion-beam etching* (RIBE) and *chemically assisted ion-beam etching* (CAIBE) combine the advantages of physical and chemical etching. These processes use a chemically reactive species to drive material removal, but are assisted physically by the impact of ions onto the surface. In RIBE, also known as *deep reactive-ion etching* (DRIE), vertical trenches hundreds of nanometers deep can be produced by periodically interrupting the etching process and depositing a polymer layer, as shown in Fig. 28.23d.

In CAIBE, ion bombardment can assist dry chemical etching by:

- Making the surface more reactive
- Clearing the surface of reaction products and allowing the chemically reactive species access to the cleared areas

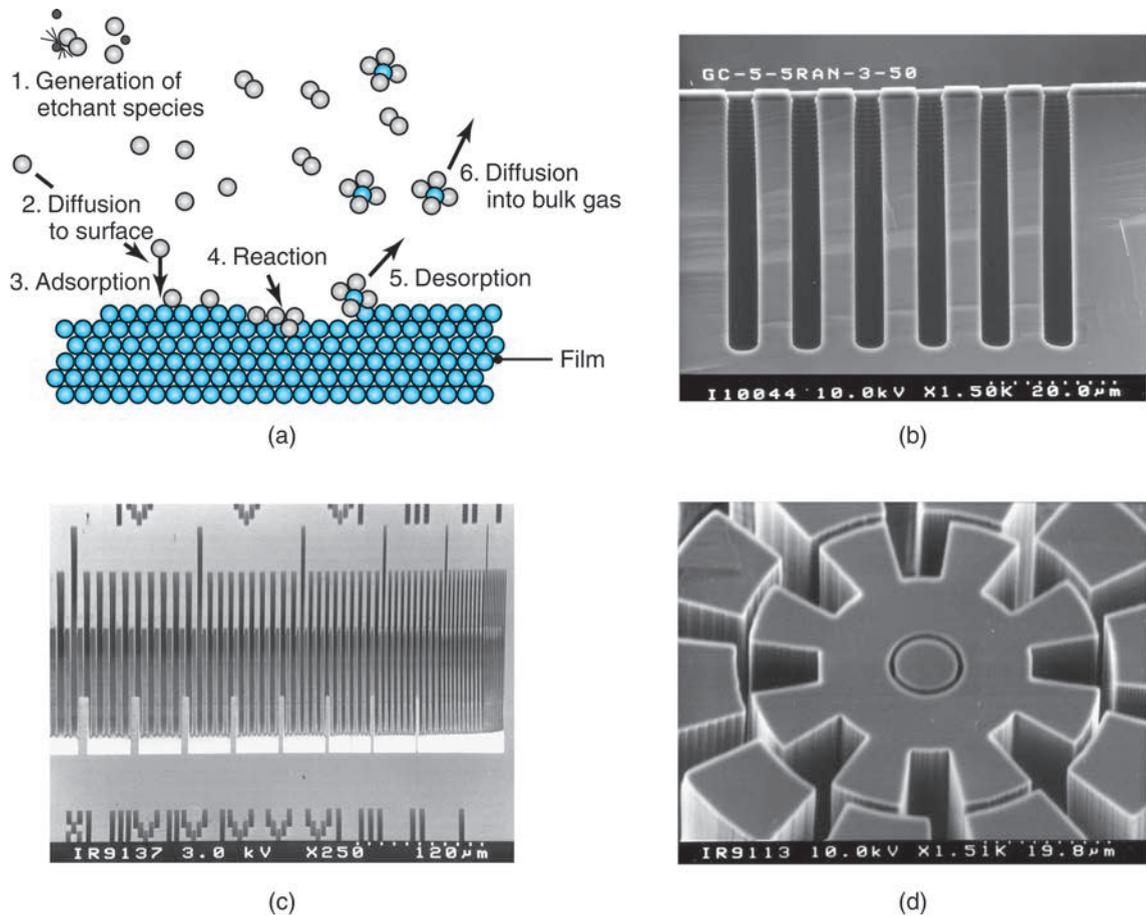


FIGURE 28.23 (a) Schematic illustration of reactive plasma etching. (b) Example of a deep reactive-ion etched trench; note the periodic undercuts, or scallops. (c) Near-vertical sidewalls produced through deep reactive-ion etching (DRIE), an anisotropic-etching process. (d) An example of cryogenic dry etching, showing a 145- μm deep structure etched into silicon with the use of a 2.0- μm -thick oxide masking layer; the substrate temperature was -140°C during etching. *Source:* (a) Based on M. Madou. (b) through (d) After R. Kassing and I.W. Rangelow, University of Kassel, Germany.

- Providing the energy to drive surface chemical reactions; however, the neutral species do most of the etching

Physical–chemical etching is extremely useful because the ion bombardment is directional, so that etching is anisotropic. Also, the ion-bombardment energy is low and does not contribute much to mask removal, thus allowing the generation of near-vertical walls with very large aspect ratios. Since the ion bombardment does not remove material directly, masks can be used.

Cryogenic Dry Etching. This method is used to obtain very deep features with vertical walls. The workpiece is first lowered to cryogenic temperatures, then the CAIBE process takes place. The very low temperatures involved ensure that insufficient energy is available for a surface chemical reaction to take place, unless ion bombardment is normal to the surface. Oblique impacts, such as those occurring on sidewalls in deep crevices, cannot drive the chemical reactions.

Because dry etching is not selective, etch stops cannot be applied directly and dry-etching reactions must be terminated when the target film is removed. This can be done by measuring the wavelength of light being emitted during a reaction; when the target film is removed, the wavelength of light emitted will change and can be detected with proper sensors.

EXAMPLE 28.2 Comparison of Wet and Dry Etching

Consider the case where a $\langle 100 \rangle$ wafer (see Fig. 28.5) has an oxide mask placed on it, in order to produce square or rectangular holes. The sides of the square are oriented precisely within the $\langle 100 \rangle$ direction of the wafer surface, as shown in Fig. 28.24.

Isotropic etching results in the cavity shown in Fig. 28.24a, and since etching occurs at constant rates in all directions, a rounded cavity that undercuts the mask is produced. An orientation-dependent etchant produces the cavity shown in Fig. 28.24b. Because etching is much faster in the $\langle 100 \rangle$ and $\langle 110 \rangle$ directions than in the $\langle 111 \rangle$ direction, sidewalls defined by the $\langle 111 \rangle$ plane are

generated. For silicon, these sidewalls are at an angle of 54.74° to the surface.

The effect of a larger mask or shorter etch time is shown in Fig. 28.24c. The resultant pit is defined by $\langle 111 \rangle$ sidewalls and by a bottom in the $\langle 100 \rangle$ direction parallel to the surface. A rectangular mask and the resulting pit are shown in Fig. 28.24d. Deep reactive-ion etching is depicted in Fig. 28.24e. Note that a polymer layer is deposited periodically onto the hole sidewalls, to allow for deep pockets, but scalloping (greatly exaggerated in the figure) is unavoidable. A hole resulting from CAIBE is shown in Fig. 28.24f.

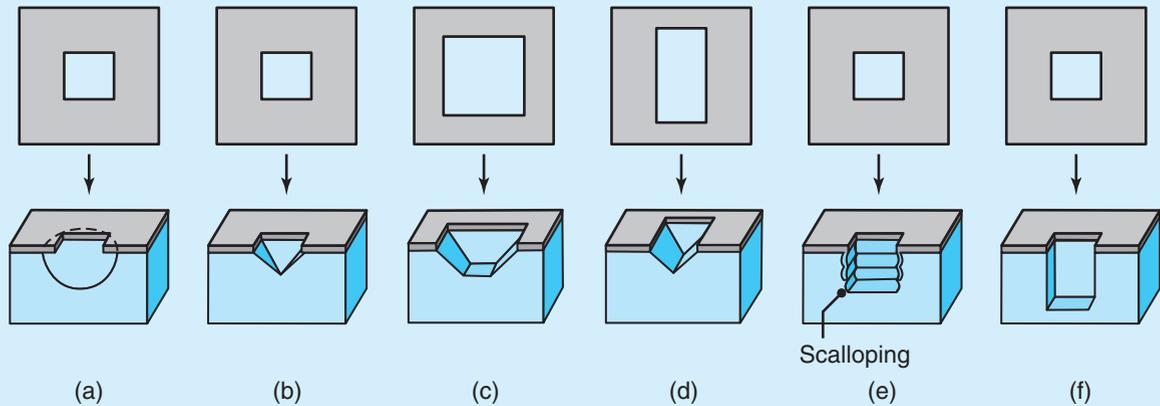


FIGURE 28.24 Holes generated from a square mask in (a) isotropic (wet) etching; (b) orientation-dependent etching (ODE); (c) ODE with a larger hole; (d) ODE of a rectangular hole; (e) deep reactive-ion etching; and (f) vertical etching. *Source:* After M. Madou.

28.9 Diffusion and Ion Implantation

Recall that the operation of microelectronic devices depends on regions that have different doping types and concentrations. The electrical characteristics of these regions are altered through the introduction of dopants into the substrate, by *diffusion* and *ion-implantation processes*. This step in the fabrication sequence is repeated several times, since many different regions of microelectronic devices must be defined.

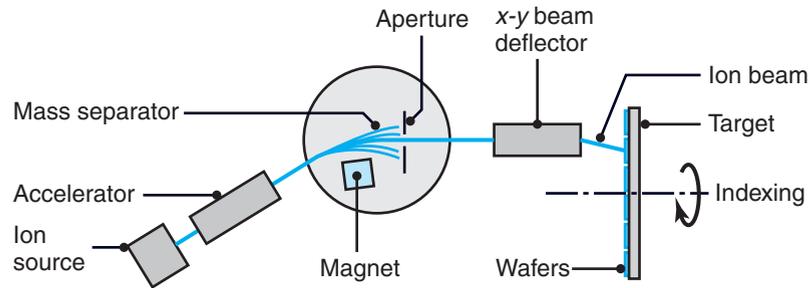


FIGURE 28.25 Schematic illustration of an apparatus for ion implantation.

In the diffusion process, the movement of atoms is a result of thermal excitation. Dopants can be introduced to the substrate surface in the form of a deposited film or the substrate can be placed in a vapor, containing the dopant source. The process takes place at temperatures usually 800°C – 1200°C (1500°F – 2200°F). Dopant movement within the substrate is strictly a function of temperature, time, and the diffusion coefficient (or *diffusivity*) of the dopant species, as well as the type and quality of the substrate material.

Because of the nature of diffusion, the dopant concentration is very high at the substrate surface, and drops off sharply away from the surface. To obtain a more uniform concentration within the substrate, the wafer is heated further to drive in the dopants, in a process called **drive-in diffusion**. Diffusion, whether desired or not, is highly isotropic and always occurs at high temperatures, a phenomenon that is taken into account during subsequent processing steps.

Ion implantation is a much more extensive process and requires specialized equipment (Fig. 28.25; see also Section 34.7). Implantation is accomplished by accelerating the ions through a high-voltage field of as much as 1 million electron volts, and then by choosing the desired dopant by means of a mass separator. In a manner similar to that of cathode-ray tubes, the beam is swept across the wafer by sets of deflection plates, thus ensuring uniformity of coverage of the substrate. The whole implantation operation must be performed in a vacuum.

The high-velocity impact of ions on the silicon surface damages the lattice structure and results in lower electron mobilities. Although this condition is undesirable, the damage can be repaired by an annealing step, which involves heating the substrate to relatively low temperatures, usually 400°C – 800°C (750°F – 1500°F), for a period of 15–30 min. Annealing provides the energy that the silicon lattice needs to rearrange and mend itself. Another important function of annealing is driving in the implanted dopants. Implantation alone imbeds the dopants less than half a micron below the silicon surface; annealing enables the dopants to diffuse to a more desirable depth of a few microns.

EXAMPLE 28.3 Processing of a *p*-type Region in *n*-type Silicon

Given: It is desired to create a *p*-type region within a sample of *n*-type silicon.

Find: Draw cross-sections of the sample at each processing step in order to accomplish this task.

Solution: Refer to Fig. 28.26. This simple device, known as a *pn-junction diode*, is the foundation for most semiconductor devices.

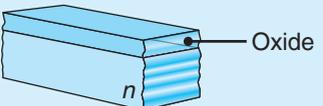
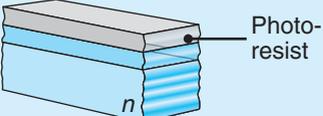
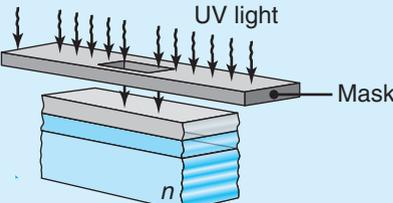
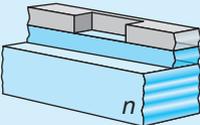
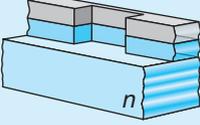
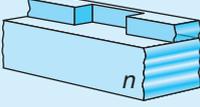
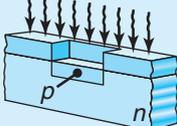
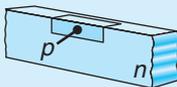
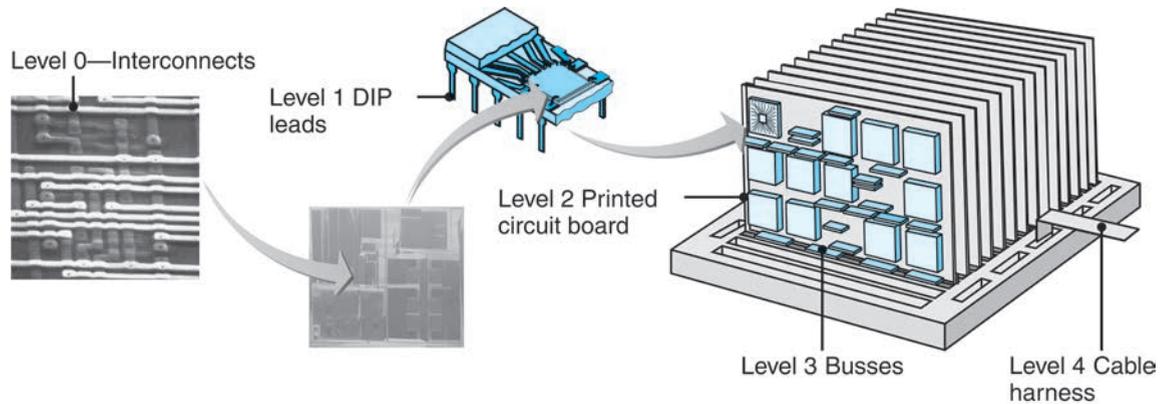
Processing step	Cross-section	Description
1.		Sample of <i>n</i> -type silicon
2.		Grow silicon dioxide by oxidation
3.		Apply photoresist
4.		Expose photoresist, using appropriate lithographic mask
5.		Develop photoresist
6.		Etch silicon dioxide
7.		Remove photoresist
8.		Implant boron
9.		Remove silicon dioxide

FIGURE 28.26 Fabrication sequence for a *pn*-junction diode.

28.10 Metallization and Testing

The preceding sections focused on device fabrication. Generating a complete and functional integrated circuit requires that these devices be interconnected, and this must take place on a number of levels (Fig. 28.27). **Interconnections** are made using



Level	Element example	Interconnection method
Level 0	Transistor within an IC	IC metallization
Level 1	ICs, other discrete components	Package leads or module interconnections
Level 2	IC packages	Printed circuit board
Level 3	Printed circuit boards	Connectors (busses)
Level 4	Chassis or box	Connectors/cable harnesses
Level 5	System, e.g., computer	

FIGURE 28.27 Connections between elements in the hierarchy for integrated circuits.

metals that exhibit low electrical resistance and good adhesion to dielectric insulator surfaces. Aluminum and aluminum–copper alloys remain the most commonly used materials for this purpose in VLSI technology today.

Because device dimensions continue to shrink, **electromigration** has become more of a concern with aluminum interconnects, a process by which aluminum atoms are moved physically by the impact of drifting electrons under high currents. In extreme cases, electromigration can lead to severed or shorted metal lines. Solutions to the problem include (a) addition of sandwiched metal layers, such as tungsten and titanium and (b) use of pure copper, which displays lower resistivity and has significantly better electromigration performance than aluminum. Metals are deposited by standard deposition techniques, an operation called **metallization**. Modern ICs typically have one to six layers of metallization, each layer of metal being insulated by a dielectric. Interconnection patterns are generated through lithographic and etching processes.

Planarization, that is, producing a planar surface of interlayer dielectrics, is critical to the reduction of metal shorts and the line width variation of the interconnect. A common method used to achieve a planar surface is a uniform oxide-etch process that smoothens out the peaks and valleys of the dielectric layer. Planarizing high-density interconnects has now become the process of **chemical–mechanical polishing (CMP)**, described in Section 26.7. This process entails physically polishing the wafer surface, in a manner similar to that by which a disk or belt sander flattens the ridges

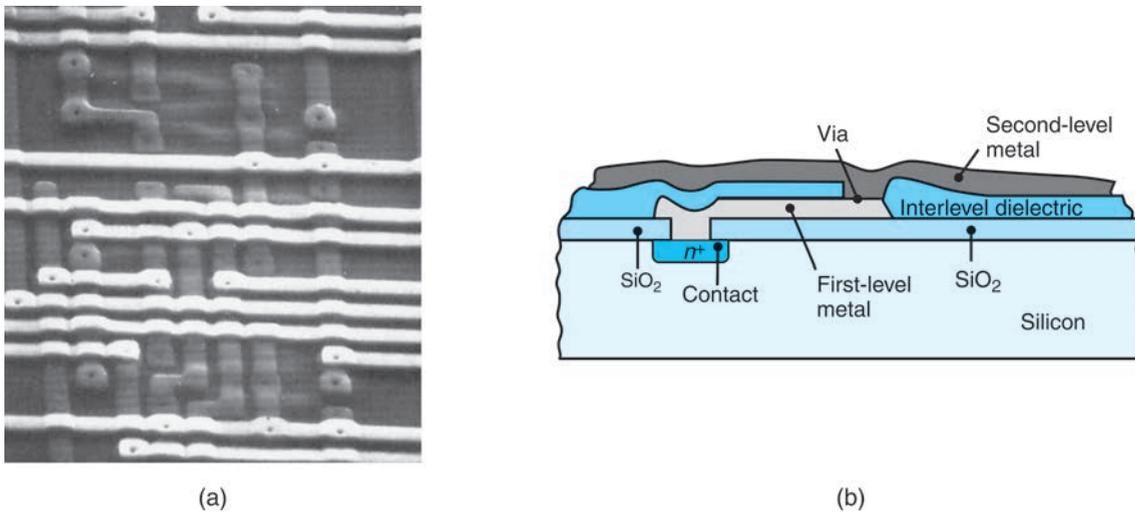


FIGURE 28.28 (a) Scanning-electron microscope (SEM) photograph of a two-level metal interconnect; note the varying surface topography. (b) Schematic illustration of a two-level metal interconnect structure. *Source:* (a) Courtesy of National Semiconductor Corporation. (b) After R.C. Jaeger.

in a piece of wood. A typical CMP process combines an abrasive medium with a polishing compound or slurry, and can polish a wafer to within $0.03\ \mu\text{m}$ ($1.2\ \mu\text{in.}$) of being perfectly flat, with an R_q roughness (see Section 4.4) on the order of $0.1\ \text{nm}$ for a new silicon wafer.

Layers of metal are connected together by **vias**, and access to the devices on the substrate is achieved through **contacts** (Fig. 28.28). As devices continue to become smaller and faster, the size and speed of some chips have become limited by the metallization process itself. Wafer processing is completed upon application of a *passivation layer*, usually silicon nitride (Si_3N_4). The silicon nitride acts as a barrier to sodium ions and also provides excellent scratch resistance.

The next step is to test each of the individual circuits on the wafer (Fig. 28.29). Each chip, also known as a **die**, is tested by a computer-controlled probe platform, containing needlelike probes that access the bonding pads on the die. The probes are of two forms:

1. **Test patterns or structures:** The probe measures test structures, often outside of the active dice, placed in the scribe line (the empty space between dies); these probes consist of transistors and interconnect structures that measure various processing parameters, such as resistivity, contact resistance, and electromigration.
2. **Direct probe:** This approach involves 100% testing on the bond pads of each die.

The platform scans across the wafer and uses computer-generated timing waveforms, to test whether each circuit is functioning properly. If a chip is defective, it is marked with a drop of ink. Up to one-third of the cost of a microelectronic circuit can be incurred during this testing.

After the wafer-level testing is completed, back grinding may be done to remove a large amount of the original substrate. The final die thickness depends on the packaging requirement, but anywhere from 25 to 75% of the wafer thickness may be removed. After back grinding, each die is separated from the wafer. *Diamond*

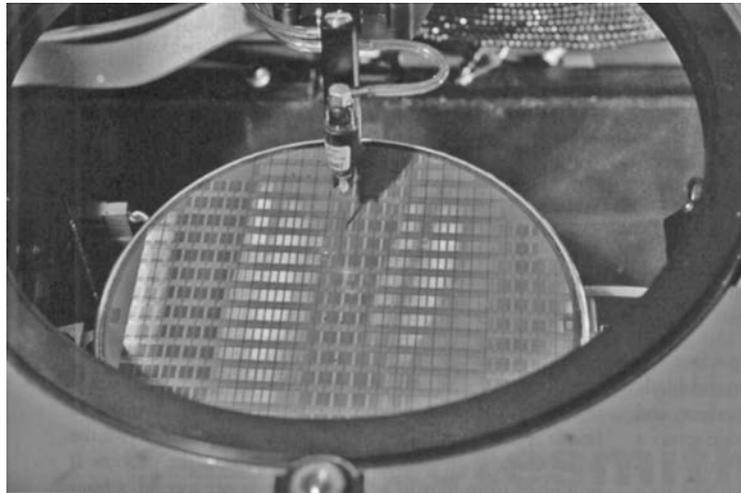


FIGURE 28.29 A probe (top center) checking for defects in a wafer; an ink mark is placed on each defective die. *Source:* Courtesy of Intel Corp.

sawing is a commonly used separation technique and results in very straight edges, with minimal chipping and cracking damage. The chips are then sorted, the functional dice are sent on for packaging, and the inked dice are discarded.

28.11 Wire Bonding and Packaging

.....

The working dice must be attached to a more rugged foundation to ensure reliability. One simple method is to fasten a die to its packaging material with epoxy cement; another method makes use of a eutectic bond, made by heating metal-alloy systems (see Section 4.3). One widely used mixture is 96.4% Au and 3.6% Si, which has a eutectic point at 370°C (700°F).

Once the chip has been attached to its substrate, it must be connected electrically to the package leads. This is accomplished by *wire bonding* very thin (25 μm diameter; 0.001 $\mu\text{in.}$) gold wires from the package leads to bonding pads, located around the perimeter or down the center of the die (Fig. 28.30). The bonding pads on the die are typically drawn at 75–100 μm (0.003–0.004 in.) per side, and the bond wires are attached by means of thermocompression, ultrasonic, or thermosonic techniques (Fig. 28.31).

The connected circuit is now ready for final packaging. The *packaging* process largely determines the overall cost of each completed IC since the circuits are mass produced on the wafer, but are then packaged individually. Packages are available in a wide variety of styles; the appropriate one must reflect the operating requirements. Consideration of a circuit's package includes the chip size, number of external leads, operating environment, heat dissipation, and power requirements; for example, ICs used for military and industrial applications require packages of particularly high strength, toughness, and resistance to temperature.

Packages are produced from polymers, metals, or ceramics. Metal containers are made from alloys such as Kovar (an iron–cobalt–nickel alloy with a low coefficient of expansion; see Section 3.6), which provide a hermetic seal and good thermal conductivity, but are limited in the number of leads that can be used. Ceramic packages usually are produced from aluminum oxide (Al_2O_3), are hermetic, and

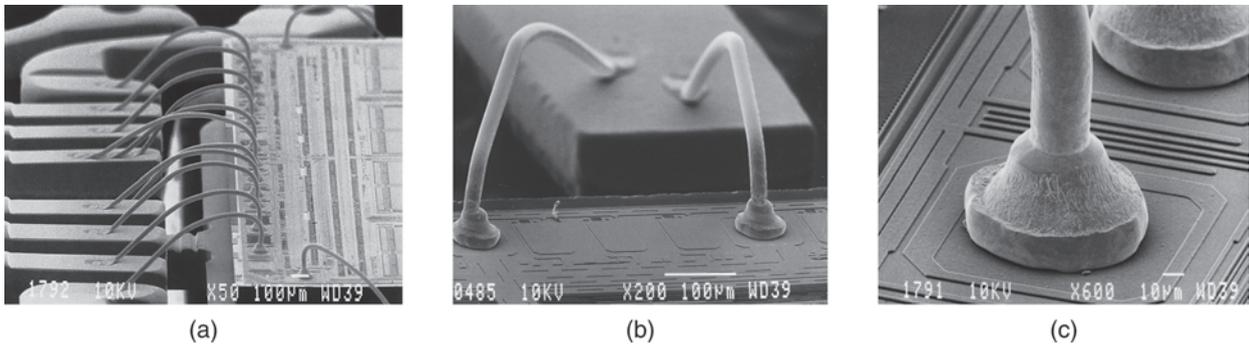


FIGURE 28.30 (a) SEM photograph of wire bonds connecting package leads (left-hand side) to die bonding pads. (b) and (c) Detailed views of (a). *Source:* Courtesy of Micron Technology, Inc.

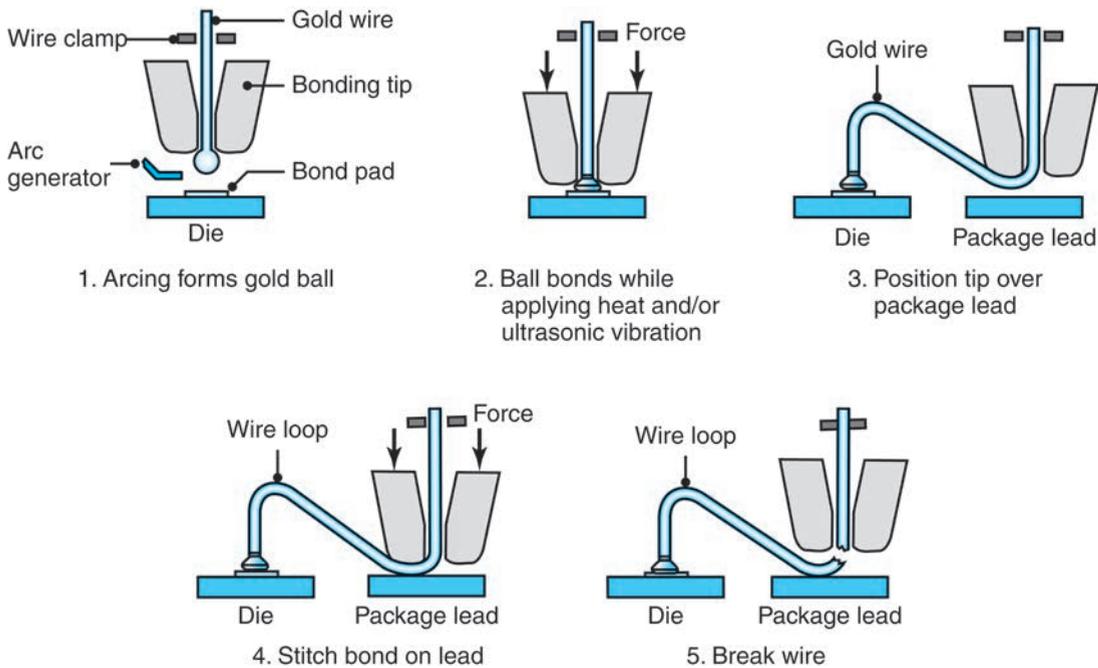


FIGURE 28.31 Schematic illustration of thermosonic welding of gold wires from package leads to bonding pads.

have good thermal conductivity, but have higher lead counts than metal packages; they are also more expensive. Plastic packages are inexpensive and have high lead counts, but they cannot withstand high temperatures and are not hermetic.

An older style of packaging is the **dual-in-line package (DIP)**, shown schematically in Fig. 28.32a. Characterized by low cost and ease of handling, DIP packages are made of thermoplastics, epoxies, or ceramics, and can have from 2 to 500 external leads. Ceramic packages are designed for use over a broader temperature range and in high-reliability and military applications, but cost considerably more than plastic packages.

Figure 28.32b shows a *flat ceramic package* in which the package and all of the leads are in the same plane. This package style does not offer the ease of handling

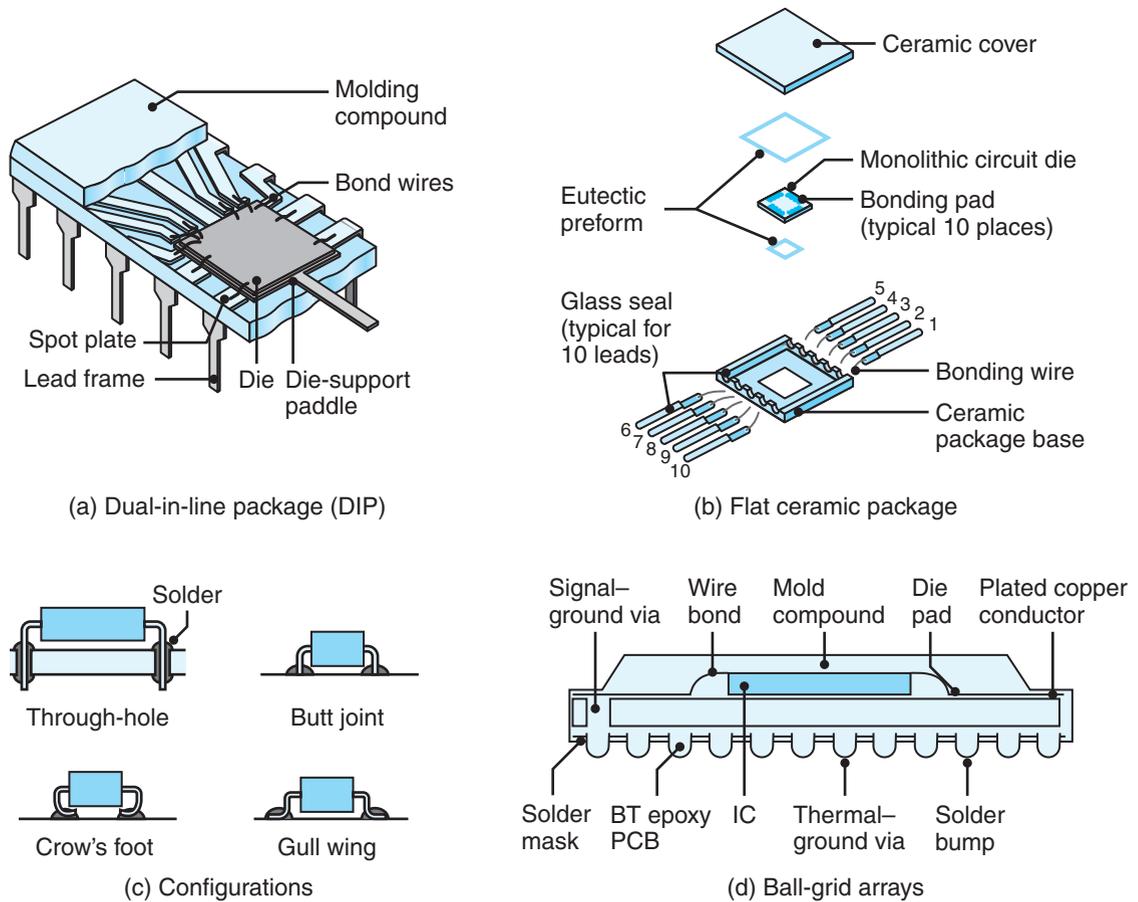


FIGURE 28.32 Schematic illustrations of various IC packages.

or the modular design of the DIP package. For that reason, it usually is affixed permanently to a multiple-level circuit board, in which the low profile of the flat package is necessary.

Surface-mount packages have become common for today's integrated circuits. Some examples are shown in Fig. 28.32c; note that the main difference among them is in the shape of the connectors. The DIP connection to the surface board is *via prongs*, which are inserted into corresponding holes, while a surface mount is soldered onto a specially fabricated pad or *land* (a raised solder platform for interconnections among components in a printed circuit board). Package size and layouts are selected from standard patterns, and usually require adhesive bonding of the package to the board, followed by **wave soldering** of the connections (see Section 32.3.3).

Faster and more versatile chips require increasingly tightly spaced connections. **Pin-grid arrays** (PGAs) use tightly packed pins that connect onto printed circuit boards by way of through-holes. PGAs and other in-line and surface-mount packages are, however, extremely susceptible to plastic deformation of the wires and legs, especially with small-diameter, closely spaced wires. One way of achieving tight packing of connections, and avoiding the difficulties of slender connections, is through **ball-grid arrays** (BGAs), as shown in Fig. 28.32d. This type of array has a solder-plated coating on a number of closely spaced metal balls on the underside of the package. The spacing between the balls can be as small as $50\ \mu\text{m}$ ($2000\ \mu\text{in.}$), but more

commonly it is standardized as 1.0 mm (0.040 in.), 1.27 mm (0.050 in.), or 1.5 mm (0.060 in.).

Although BGAs can be designed with over 1000 connections, this is extremely rare and usually 200–300 connections are sufficient for demanding applications. By using the **reflow soldering** technique (see Section 32.3.2), the solder serves to center the BGA by surface tension, thus resulting in well-defined electrical connections for each ball. After the chip has been sealed in the package, it undergoes final testing. Because one of the main purposes of packaging is isolation from the environment, testing at this stage usually involves such factors as heat, humidity, mechanical shock, corrosion, and vibration. Destructive tests also are performed to determine the effectiveness of sealing.

Chip on Board. *Chip on board* (COB) designs refer to the direct placement of chips onto an adhesive layer on a circuit board. Electrical connections are then made by wire bonding the chips directly to the pads on the circuit board. After wire bonding, final encapsulation with an epoxy is necessary, not only to attach the IC package more securely to the printed circuit board but also to transfer heat evenly during its operation.

Flip-chip on Board. The flip-chip on board (FOB) technology, illustrated in Fig. 28.33, involves the direct placement of a chip with solder bumps onto an array of pads on the circuit board. The main advantage to flip chips, and ball-grid array packages, is that the space around the package, normally reserved for bond pads, is saved; thus, a higher level of miniaturization can be achieved.

System in Package. A trend that allows for more compact devices involves incorporating more than one integrated circuit into a package. Figure 28.34 illustrates the major categories of *system-in-package* (SiP) designs. Although these packages can be integrated horizontally, vertical integration through stacked or embedded structures (Figs. 28.34b and c) has the advantage of achieving performance increases over conventional packages. These benefits have been described as “more than Moore” (see Example 28.1), although SiPs also have other advantages, such as (a) they present reduced size and less noise, (b) cross talk between chips can be better isolated, and (c) individual chips can be upgraded more easily. On the other hand, these packages are more complex, require higher power density and associated heat extraction, and are more expensive than conventional packages.

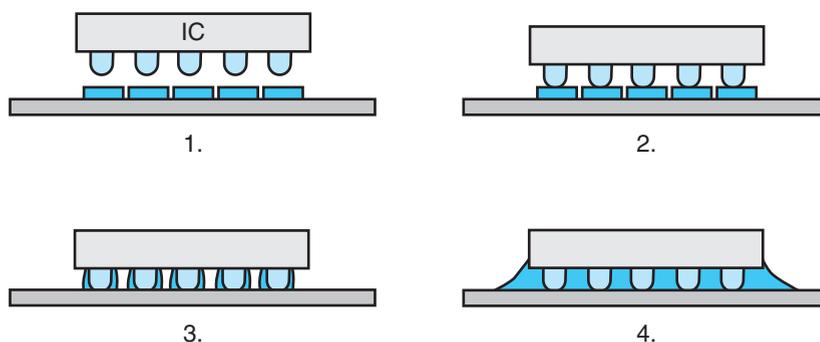


FIGURE 28.33 Illustration of flip-chip technology. Flip-chip package with 1. Solder-plated metal balls and pads on the printed circuit board. 2. Flux application and placement. 3. Reflow soldering. 4. Encapsulation.

SiP packages can, however, be made very simple by incorporating more than one chip inside a single package, as shown in Fig. 28.34a. To preserve area on a circuit board, chips and/or flip chips can be stacked and bonded to a circuit board, to produce three-dimensional integrated circuits, as illustrated in Fig. 28.34b. Here, an

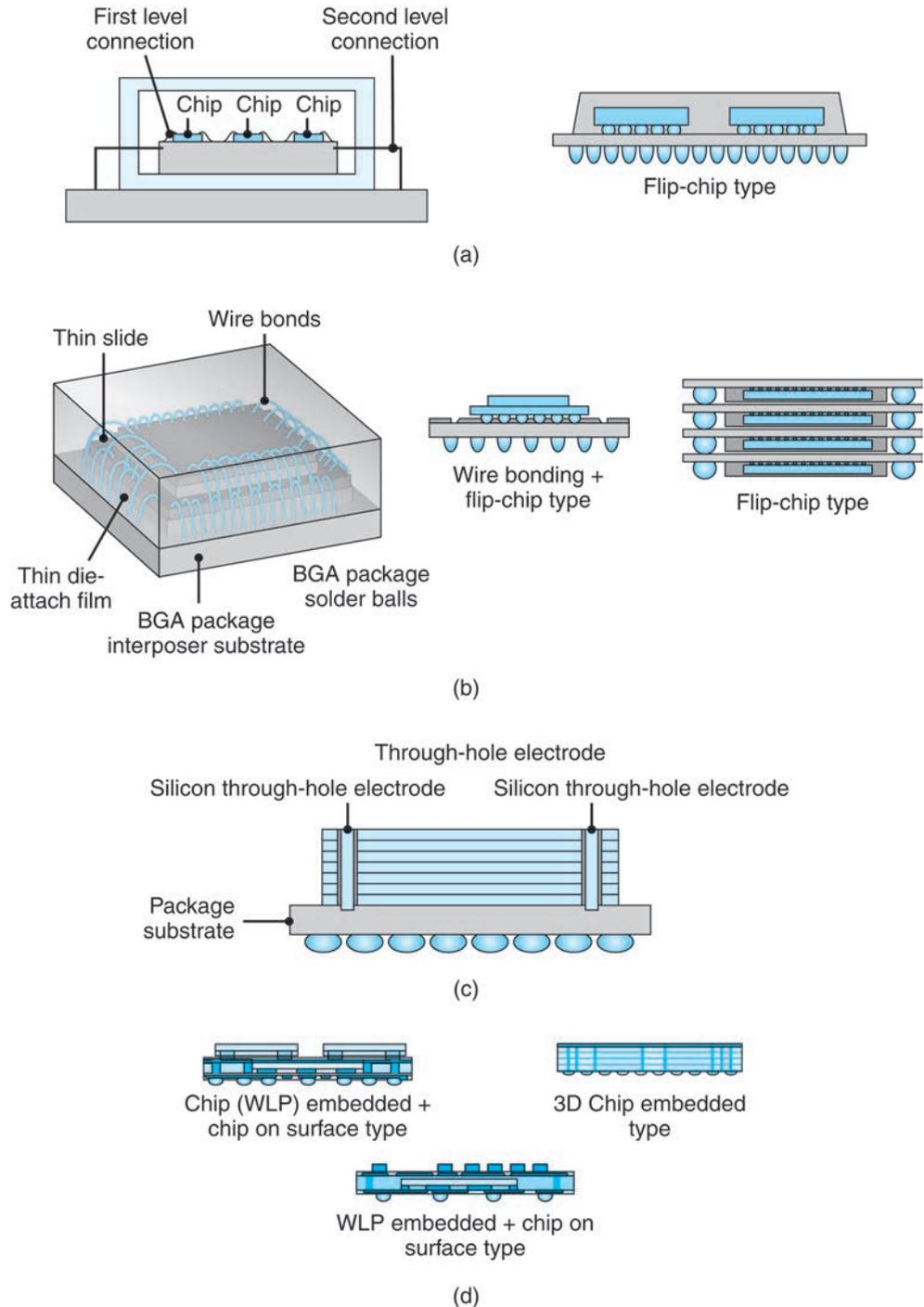


FIGURE 28.34 Major categories of system-in-package designs. (a) Horizontal placement, or multichip modules (MCMs); (b) interposer-type stacked structure; (c) interposerless stacked structure with through-silicon vias; and (d) embedded structure. WLP = wafer level package.

interposing layer, commonly an adhesive, separates the chips and electrically isolates adjacent layers. An alternative is to employ a so-called *interposerless* structure, using **through-silicon vias** (TSVs) instead of wire bonding, to provide electrical connections to all layers. TSVs are sometimes considered a packaging feature, but it has been noted that this is perhaps a case of 3D integration of a wafer, as shown in Fig. 28.34c.

28.12 Yield and Reliability

Yield is defined as the ratio of functional chips to the total number of chips produced. The overall yield of the total IC manufacturing process is the product of the wafer yield, bonding yield, packaging yield, and test yield. This quantity can range from only a few percent for new processes to more than 90% for mature manufacturing lines. Most yield loss occurs during wafer processing, due to its more complex nature. Wafers are commonly separated into regions of good and bad chips. Failures at this stage can arise from point defects (such as oxide pinholes), film contamination, metal particles, and area defects (such as uneven film deposition or nonuniformity of the etch).

A major concern about completed ICs is their **reliability** and **failure rate**. Since no device has an infinite lifetime, statistical methods are used to characterize the expected lifetimes and failure rates of microelectronic devices. The unit of failure rate is the FIT (failure in time), defined as *one failure per 1 billion device-hours*. However, complete systems may have millions of devices, so the overall failure rate in entire systems is correspondingly higher.

Equally important in failure analysis is determining the *failure mechanism*, that is, the actual process that causes the device to fail. Common failures due to processing involve:

- Diffusion regions: nonuniform current flow and junction breakdown
- Oxide layers: dielectric breakdown and accumulation of surface charge
- Lithography: uneven definition of features and mask misalignment
- Metal layers: poor contact and electromigration, resulting from high current densities
- Other failures, originating in improper chip mounting, poorly formed wire bonds, or loss of the package's hermetic seal

Because device lifetimes are very long, it is impractical to study device failure under normal operating conditions. One method of studying failures efficiently is **accelerated life testing**, which involves accelerating the conditions whose effects cause device breakdown. Cyclic variations in temperature, humidity, voltage, and current are used to stress the components. Chip mounting and packaging are strained by cyclical temperature variations. The statistical data taken from these tests are then used to predict device-failure modes and device life under normal operating conditions.

28.13 Printed Circuit Boards

Packaged ICs seldom are used alone; rather, they usually are combined with other ICs to serve as building blocks of a yet larger system. A *printed circuit board* (PCB) is the substrate for the final interconnections among all of the completed chips, and serves as the communication link between the outside world and the microelectronic circuitry within each packaged IC. In addition to possessing ICs, circuit boards usually contain discrete circuit components (such as resistors and capacitors), which take up too much



Video Solution 28.2 Yield and Reliability of Integrated Circuits

“real estate” on the limited silicon surface, have special power-dissipation requirements, or cannot be implemented on a chip. Other common discrete components are inductors (that cannot be integrated onto the silicon surface), high-performance transistors, large capacitors, precision resistors, and crystals (for frequency control).

A PCB is basically a plastic (resin) material, containing several layers of copper foil (Fig. 28.35). *Single-sided PCBs* have copper tracks on only one side of an insulating substrate; *double-sided boards* have copper tracks on both sides. *Multilayered boards* also can be constructed from alternating layers of copper and insulator, but single-sided boards are the simplest form of circuit board.

Double-sided boards usually must have locations where electrical connectivity is established between the features on both sides of the board; this is accomplished with vias, as shown in Fig. 28.35. Multilayered boards can have partial, buried, or through-hole vias to allow for extremely flexible PCBs. Double-sided and multilayered boards are preferable, because IC packages can be bonded to both sides of the board, thus allowing for more compact designs.

The insulating material is usually an epoxy resin, 0.25–3 mm (0.01–0.12 in.) thick, reinforced with an epoxy-glass fiber, and is referred to as E-glass (see Section 9.2.1). The assembly is produced by impregnating sheets of glass fiber with epoxy, and pressing the layers together between hot plates or rolls. The heat and pressure cure the board, resulting in a stiff and strong basis for printed circuit boards.

Boards are first sheared to a desired size, and about 3-mm-diameter locating holes are then drilled or punched into the board’s corners, to permit alignment and proper location of the board within the chip-insertion machines. Holes for vias and connections are punched or produced through CNC drilling (Section 37.3); stacks of boards can be drilled simultaneously to increase production rates.

The conductive patterns on circuit boards are defined by lithography, although originally they were produced through screen-printing technologies, hence the term *printed circuit board* or *printed wiring board* (PWB). In the *subtractive method*, a copper foil is bonded to the circuit board. The desired pattern on the board is defined

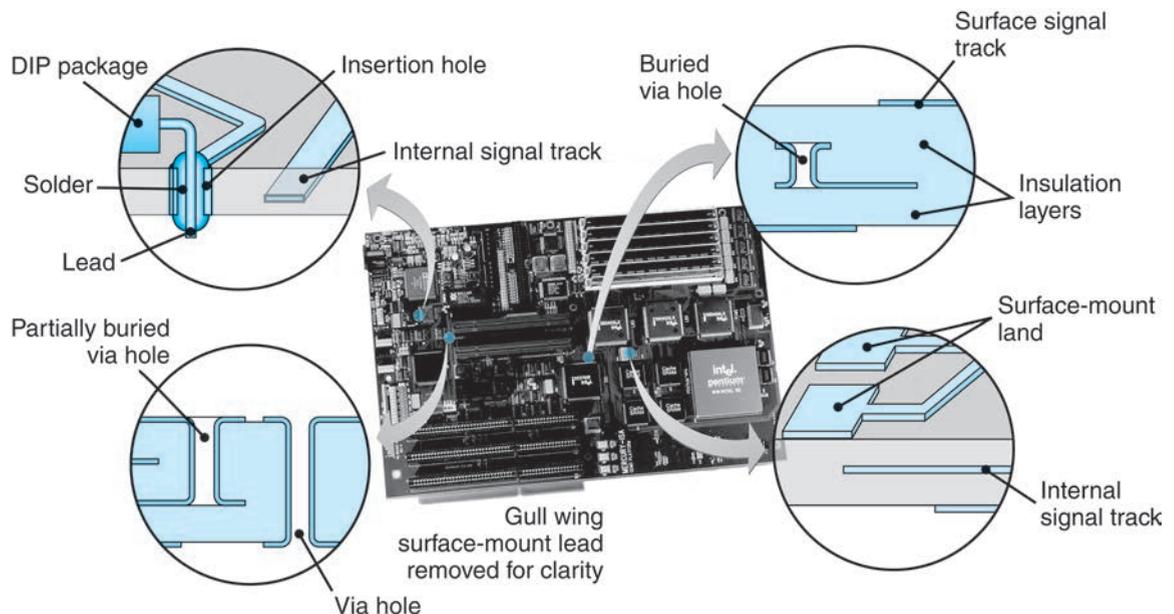


FIGURE 28.35 Printed circuit board structures and design features.

by a positive mask, developed through photolithography, and the remaining copper is removed through wet etching. In the *additive method*, a negative mask is placed directly onto an insulator substrate, to define the desired shape. Electroless plating and electroplating of copper serve to define the connections, tracks, and lands on the circuit board.

The ICs and other discrete components are then soldered to the board. This is the final step in making both the ICs and the microelectronic devices they contain into larger systems, through connections on PCBs. *Wave soldering* and *reflow paste soldering* (see Section 32.3.3 and Example 32.1) are the preferred methods of soldering ICs onto circuit boards.

Basic design considerations in laying out PCBs are:

1. Wave soldering should be used only on one side of the board; thus, all through-hole mounted components should be inserted from the same side of the board. Surface-mount devices placed on the insertion side of the board must be reflow soldered in place; surface-mount devices on the lead side can be wave soldered.
2. To allow good solder flow in wave soldering, IC packages should be laid out carefully on the PCB. Inserting the packages in the same direction is advantageous for automated placing, because random orientations can cause problems in the flow of solder across all of the connections.
3. The spacing of ICs is determined mainly by the need to remove heat during the operation. Sufficient clearance between packages and adjacent boards is thus required to allow forced airflow and heat convection.
4. There should be sufficient space also around each IC package to allow for reworking and repairing without disturbing adjacent devices.

SUMMARY

- The microelectronics industry continues to develop rapidly, and possibilities for new device concepts and circuit designs appear to be endless. The fabrication of microelectronic devices and integrated circuits involves several different types of processes, many of which have been adapted from those of other fields in manufacturing.
- A rough shape of single-crystal silicon is first obtained by the Czochralski process. This shape is ground to a solid cylinder of well-controlled dimensions, and a notch or flat is machined into the cylinder. The cylinder is then sliced into wafers, which are ground on their edges and subjected to chemical–mechanical polishing to complete the wafer.
- After bare wafers have been prepared, they undergo repeated oxidation or film deposition, and lithographic or etching steps to open windows in the oxide layer in order to access the silicon substrate.
- Wet etching is isotropic and relatively fast. Dry etching, using gas plasmas, is anisotropic and allows for more accurate lithography and large-scale integration of integrated circuits.
- After each of the processing cycles is completed, dopants are introduced into various regions of the silicon structure, through diffusion and ion implantation. The devices are then interconnected by multiple metal layers, and the completed circuit is packaged and made accessible through electrical connections.
- The packaged circuit and other discrete devices are then soldered to a printed circuit board for final installation.

KEY TERMS

Accelerated-life testing	Epitaxy	Microcontact printing	Selectivity
Bonding	Etching	Micromolding in capillaries	Semiconductor
Chemical-mechanical polishing	Evaporation	Microtransfer molding	Silicon
Chemical-vapor deposition	Failure rate	Oxidation	Soft lithography
Chip	Film deposition	Packaging	Sputtering
Chip on board	Flip-chip on board	Photoresist	Surface-mount package
Contacts	Gallium arsenide	Pitch splitting	System in package
Critical dimension	Immersion lithography	lithography	Three-dimensional integrated circuits
Czochralski process	Integrated circuit	Planarization	Very large scale integration
Die	Ion implantation	Postbaking	Vias
Diffusion	LELE process	Prebaking	Wafer
Dopants	Line width	Printed circuit board	Wafer-scale integration
Dry etching	Lithography	Registration	Wet etching
Dry oxidation	Masking	Reliability	Wet oxidation
Dual-in-line package	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor	Reticle	Wire bonding
Electromigration	Metallization	SCALPEL	Yield
		Selective oxidation	

BIBLIOGRAPHY

- Campbell, S.A., *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, 2nd ed., Oxford University Press, 2001.
- Doering, R., and Nishi, Y., *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, 2nd ed., CRC Press, 2008.
- Geng, H., *Semiconductor Manufacturing Handbook*, McGraw-Hill, 2005.
- Harper, C.A. (ed.), *Electronic Packaging and Interconnection Handbook*, 4th ed., McGraw-Hill, 2004.
- Jackson, K.A., and Schroter, W. (eds.), *Handbook of Semiconductor Technology: Processing of Semiconductors*, 2 vols., Wiley, 2000.
- Jaeger, R.C., *Introduction to Microelectronic Fabrication*, 2nd ed., Prentice Hall, 2001.
- Khandpur, R.S., *Printed Circuit Boards: Design, Fabrication, and Assembly*, McGraw-Hill, 2005.
- May, G.S., and Spanos, C.J., *Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control*, Wiley, 2006.
- Nishi, Y., and Doering, R., *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, 2nd ed., CRC Press, 2007.
- Rizvi, S., *Handbook of Photomask Manufacturing Technology*, CRC Press, 2005.
- Schroder, D.K., *Semiconductor Material and Device Characterization*, 3rd ed., Wiley-Interscience, 2006.
- Ulrich, R.K., and Brown, W.D. (eds.), *Advanced Electronic Packaging*, Wiley, 2006.
- Van Zant, P., *Microchip Fabrication*, 5th ed., McGraw-Hill, 2004.
- Yoo, C.S., *Semiconductor Manufacturing Technology*, World Scientific Publishing, 2008.

REVIEW QUESTIONS

- 28.1** Define the terms wafer, chip, die, device, integrated circuit, line width, registration, surface mount, accelerated-life testing, and yield.
- 28.2** Why is silicon the semiconductor most used in IC technology?
- 28.3** What do the abbreviations BJT, MOSFET, VLSI, IC, CVD, CMP, LELE, and DIP stand for?
- 28.4** Explain the differences between wet and dry oxidation.
- 28.5** Explain the differences between wet and dry etching.
- 28.6** What are the purposes of prebaking and postbaking in lithography?
- 28.7** Define selectivity and isotropy, and their importance in relation to etching.
- 28.8** Compare the diffusion and ion-implantation processes.
- 28.9** Explain the difference between evaporation and sputtering.
- 28.10** What are the levels of interconnection?
- 28.11** Which is cleaner, a Class-10 or a Class-1 clean room?

- 28.12** Review Fig. 28.2 and describe the fabrication sequence for integrated circuits.
- 28.13** What is a via? Why is it important?
- 28.14** Describe how electrical connections are established between a die and a package.

QUALITATIVE PROBLEMS

- 28.17** Comment on your observations regarding the contents of Fig. V.1.
- 28.18** Describe how *n*-type and *p*-type dopants differ.
- 28.19** How is silicon nitride used in oxidation?
- 28.20** How is epitaxy different from other techniques used for deposition? Explain.
- 28.21** Note that, in a horizontal epitaxial reactor (see Fig. P28.21), the wafers are placed on a stage (susceptor) that is tilted by a small amount, usually 1° – 3° . Explain why this is done.

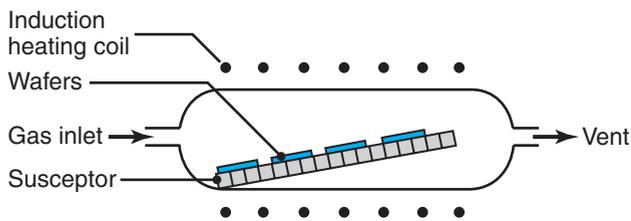


FIGURE P28.21

- 28.22** The table that follows describes three wafer-manufacturing changes: increasing the wafer diameter, reducing the chip size, and increasing process complexity. Complete the table by filling in “increase,” “decrease,” or “no change,” and indicate the effect that each change would have on the wafer yield and on the overall number of functional chips.

Change	Wafer yield	Number of functional chips
Increase wafer diameter		
Reduce chip size		
Increase process complexity		

QUANTITATIVE PROBLEMS

- 28.29** A certain wafer manufacturer produces two equal-sized wafers, one containing 500 chips and the other containing 200. After testing, it is observed that 50 chips on

- 28.15** What is a flip chip?
- 28.16** Describe the procedures of image splitting lithography and immersion lithography.

- 28.23** The speed of a transistor is directly proportional to the width of its polysilicon gate; thus, a narrower gate results in a faster transistor and a wider gate in a slower transistor. Knowing that the manufacturing process has a certain variation for the gate width (say, $\pm 0.1 \mu\text{m}$), how would a designer modify the gate size of a critical circuit in order to minimize its variation in speed? Are there any negative effects of this change?
- 28.24** What is accelerated life testing? Why is it practiced?
- 28.25** Explain the difference between a die, a chip, and a wafer.
- 28.26** A common problem in ion implantation is channeling, in which the high-velocity ions travel deep into the material via channels along the crystallographic planes before finally being stopped. How could this effect be avoided? Explain.
- 28.27** Examine the hole profiles shown in Fig. P28.27 and explain how they might be produced.

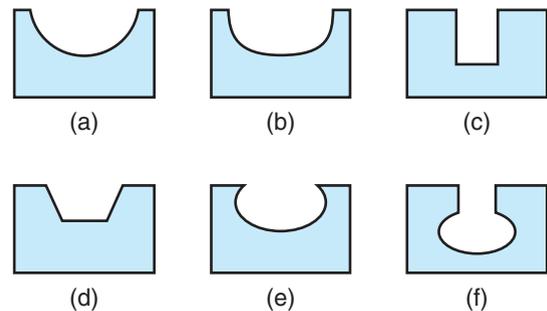


FIGURE P28.27

- 28.28** Referring to Fig. 28.24, sketch the shape of the holes generated from a circular mask.

- each wafer are defective. What are the yields of these two wafers? Can any relationship be drawn between chip size and yield?

28.30 A chlorine-based polysilicon etching process displays a polysilicon-to-resist selectivity of 5:1 and a polysilicon-to-oxide selectivity of 60:1. How much resist and exposed oxide will be consumed in etching 3500 Å of polysilicon? What would the polysilicon-to-oxide selectivity have to be in order to reduce the loss to only 40 Å of exposed oxide?

28.31 During a processing sequence, three silicon-dioxide layers are grown by oxidation to 2500 Å, 4000 Å, and 1500 Å, respectively. How much of the silicon substrate is consumed?

28.32 A certain design rule calls for metal lines to be no less than 2- μm wide. If a 1- μm thick metal layer is to be

wet etched, what is the minimum photoresist width allowed (assuming that the wet etching is perfectly isotropic)? What would be the minimum photoresist width if a perfectly anisotropic dry-etching process is used?

28.33 Using Fig. 28.20, obtain mathematical expressions for the etch rate as a function of temperature.

28.34 If a square mask of side length 100 μm is placed on a {100} plane and oriented with a side in the $\langle 100 \rangle$ direction, how long will it take to etch a hole 5 μm deep at 80°C using ethylene-diamine/pyrocatechol? Sketch the resulting profile.

28.35 Obtain an expression for the width of the trench bottom as a function of time for the mask shown in Fig. 28.19.

SYNTHESIS, DESIGN, AND PROJECTS

28.36 Describe products that would not exist today without the knowledge and techniques described in this chapter. Explain.

28.37 Inspect various electronic and computer equipment, take them apart as much as you can, and identify components that may have been manufactured by the techniques described in this chapter.

28.38 Describe your understanding of the important features of clean rooms and how they are maintained.

28.39 Make a survey of the necessity for clean rooms in various industries, including the medical, pharmacological, and aerospace industries, and what their requirements are.

28.40 Review the technical literature, and give further details regarding the type and shape of the abrasive wheel used in the wafer-cutting process shown in Step 2 in Fig. 28.2. (See also Chapter 26.)

28.41 List and discuss the technologies that have enabled the manufacture of the products described in this chapter.

28.42 Estimate the time required to etch a spur gear blank from a 75-mm thick slug of silicon.

28.43 Microelectronic devices may be subjected to hostile environments, such as high temperature, humidity, and vibration, as well as physical abuse, such as being dropped onto a hard surface. Describe your thoughts on how you would go about testing these devices for their endurance under these conditions. Are there any industry standards regarding such tests? Explain.

28.44 Review the specific devices, shown in Fig. V.2. Choose any one of these devices, and investigate what they are, what their characteristics are, how they are manufactured, and what their costs are.

Fabrication of Microelectro- mechanical Devices and Systems; Nanoscale Manufacturing

CHAPTER

29

- Many of the processes and materials used for manufacturing microelectronic devices are also used for manufacturing micromechanical devices and microelectromechanical systems; this chapter investigates topics in the production of very small mechanical and electromechanical products. The chapter begins with considerations of micromachining and surface machining of mechanical structures from silicon.
- The LIGA process and its variations are then described, along with micromolding, EFAB, and various other techniques for replicating small-scale mechanical devices.
- Solid free-form fabrication processes are sometimes suitable for the production of MEMS and MEMS devices.
- The chapter ends with a discussion of the emerging area of nanoscale manufacturing.

Typical parts made: Sensors, actuators, accelerometers, optical switches, ink-jet printing mechanisms, micromirrors, micromachines, and microdevices.

Alternative methods: Fine blanking, small scale machining, microforming.

- 29.1** Introduction 841
- 29.2** Micromachining of MEMS Devices 843
- 29.3** Electroforming-based Processes 854
- 29.4** Solid Free-form Fabrication of Devices 861
- 29.5** Nanoscale Manufacturing 866

EXAMPLES:

- 29.1** Surface Micromachining of a Hinge 846
- 29.2** Operation and Fabrication Sequence for a Thermal Ink-jet Printer 853
- 29.3** Production of Rare-earth Magnets 857

CASE STUDIES:

- 29.1** Digital Micromirror Device 847
- 29.2** Accelerometer for Automotive Air Bags 862

29.1 Introduction

The preceding chapter dealt with the manufacture of integrated circuits and products that operate purely on electrical or electronic principles, called **microelectronic devices**. These semiconductor-based devices often have the common characteristic of extreme miniaturization. A large number of devices exist that are mechanical in nature and are of a similar size as microelectronic devices. A **micromechanical device** is a product that is purely mechanical in nature, and has dimensions between a few mm and atomic length scales, such as some very small gears and hinges.

A **microelectromechanical device** is a product that combines mechanical and electrical or electronic elements at these very small length scales. A **microelectromechanical system** (MEMS) is a microelectromechanical device that also incorporates an integrated electrical system into one product. Common examples of

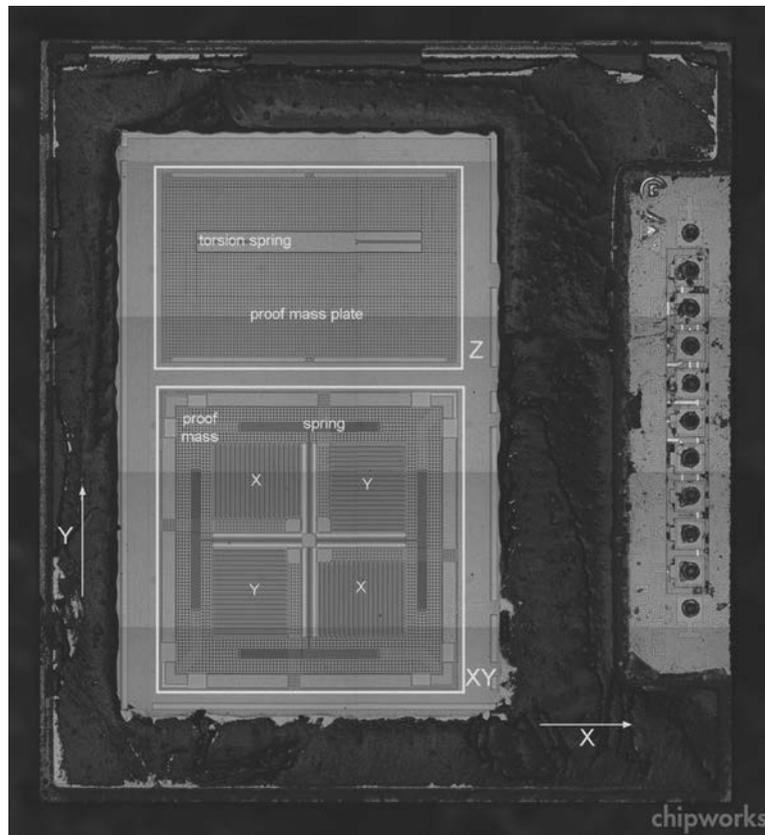


FIGURE 29.1 SEM view of a micro mechanical system, the L3G4200DH accelerometer, used in popular smartphones. Sensors such as this accelerometer are perhaps the most common application of MEMS. *Source:* Courtesy of STMicroelectronics, Inc.

micromechanical devices are sensors of all types (Fig. 29.1). Microelectromechanical systems include accelerometers in mobile phones, gyroscopes and global positioning systems (GPS), air-bag sensors in automobiles, and digital micromirror devices. Parts made by **nanoscale manufacturing** generally have dimensions that are between 10^{-6} and 10^{-9} m, as described in Section 29.5.

Many of the materials and manufacturing methods and systems described in Chapter 28 also apply to the manufacture of microelectromechanical devices and systems. However, microelectronic devices are semiconductor-based, whereas microelectromechanical devices and portions of MEMS do not have this restriction; thus, many more materials and processes are suitable for these applications. Regardless, silicon often is used because several highly advanced and reliable manufacturing processes using silicon have been developed for microelectronic applications. This chapter emphasizes the manufacturing processes that are applicable specifically to microelectromechanical devices and systems, but it should be realized that processes and concepts such as lithography, metallization, etching, coating, and packaging described in Chapter 28 still apply.

MEMS and MEMS devices are rapidly advancing, and new processes or variations on existing processes are continually being developed. A significant leap in the numbers of commercial MEMS devices occurred in the past few years as mobile

phones and tablet computers, integrated accelerometers and gyroscopes into their products. However, it should be recognized that many of the processes described in this chapter have not yet become widespread, but are of interest to researchers and practitioners in MEMS, and hold great potential for future applications.

29.2 Micromachining of MEMS Devices

The topics described in the preceding chapter dealt with the manufacture of integrated circuits and products that operate purely on electrical or electronic principles. These processes also are suitable for manufacturing devices that incorporate mechanical elements or features. The following four types of devices can be made through the approach described in Fig. 28.2:

1. **Microelectronic devices** are semiconductor-based devices that often have the common characteristics associated with extreme miniaturization, and use electrical principles in their design.
2. **Micromechanical devices** are products that are purely mechanical in nature and have dimensions between atomic length scales and a few mm; very small gears and hinges are examples.
3. **Microelectromechanical devices** are products that combine mechanical and electrical or electronic elements at very small length scales; most sensors are examples of microelectromechanical devices.
4. **Microelectromechanical systems** are microelectromechanical devices that also incorporate an integrated electrical system in one product. Microelectromechanical systems are rare compared with microelectronic, micromechanical, or microelectromechanical devices, typical examples being air-bag sensors and digital micromirror devices.

The production of features from μm to mm in size is called *micromachining*. MEMS devices have been constructed from **polycrystalline silicon** (*polysilicon*) and **single-crystal silicon**, because the technologies for integrated-circuit manufacture, described in Chapter 28, are well developed and exploited for these devices; other new processes also have been developed that are compatible with the existing processing steps. The use of anisotropic etching techniques (Section 28.8.1) allows the fabrication of devices with well-defined walls and high aspect ratios; for this reason, some MEMS devices have been fabricated from single-crystal silicon.

One of the difficulties associated with the use of silicon for MEMS devices is the high adhesion encountered between components at small length scales and the associated rapid wear (Section 33.5). Most commercial devices are designed to avoid friction by, for example, using flexing springs instead of bearings. However, this approach complicates designs and makes some MEMS devices not feasible. Consequently, significant research is being conducted to identify materials and lubricants that provide reasonable life and performance, and that would allow sliding on the microscale without excessive wear.

Silicon carbide, diamond, and metals (such as aluminum, tungsten, and nickel) have been investigated as potential MEMS materials; various lubricants also have been investigated. It is known, for example, that surrounding the MEMS device in a silicone oil practically eliminates adhesive wear, but it also limits the performance of the device. Self-assembling layers of polymers also are being investigated, as well as novel and new materials with self-lubricating characteristics. However, the tribology of MEMS devices remains a main technological barrier to any further expansion of their already widespread use.

29.2.1 Bulk Micromachining

Until the early 1980s, *bulk micromachining* was the most common method of machining at micrometer scales. This process uses orientation-dependent etches on single-crystal silicon (see Fig. 28.15b), an approach that depends on wet etching (Section 28.8) into a surface and stopping on certain crystal faces, doped regions, and etchable films to form a desired structure. As an example of this process, consider the fabrication of the silicon cantilever shown in Fig. 29.2. Using the masking techniques described in Section 28.7, the process changes a rectangular patch of the *n*-type silicon substrate to *p*-type silicon, through boron doping. Etchants such as potassium hydroxide will not be able to remove heavily boron doped silicon; hence, this patch will not be etched.

A mask is then produced—for example, with silicon nitride on silicon. When etched with potassium hydroxide, the undoped silicon will be removed rapidly, while the mask and the doped patch will essentially be unaffected. Etching progresses until the (111) planes are exposed in the *n*-type silicon substrate; they undercut the patch, leaving a suspended cantilever (as shown in Fig. 29.2).

29.2.2 Surface Micromachining

Although bulk micromachining is useful for producing very simple shapes, it is restricted to single-crystal materials because polycrystalline materials will not wet etch at different rates in different directions. Many MEMS applications require the use of other materials or material combinations; hence, alternatives to bulk micromachining are needed. One such method is *surface micromachining*, the basic steps of which are illustrated for silicon devices in Fig. 29.3.

In surface micromachining, a spacer or sacrificial layer is deposited onto a silicon substrate coated with a thin dielectric layer, called an *isolation*, or *buffer*, *layer*. Phosphosilicate glass deposited by chemical-vapor deposition is the most common material for a spacer layer, because it etches very rapidly in hydrofluoric acid, a property that is useful in step 5. Step 2 in Fig. 29.3 shows the spacer layer after the application of masking and etching. At this stage, a structural thin film is deposited onto the spacer layer; the film can be polysilicon, metal, metal alloy, or a dielectric (step 3 in Fig. 29.3).

The structural film is then patterned, usually through dry etching, in order to maintain vertical walls and tight dimensional tolerances. Finally, wet etching of the sacrificial layer leaves a freestanding, three-dimensional structure, as shown in step 5 of Fig. 29.3. The wafer must be annealed to remove the residual stresses in the deposited metal before it is patterned, otherwise the structural film will severely warp once the spacer layer is removed.



Video Solution 29.1 Design and Manufacture of an Accelerometer

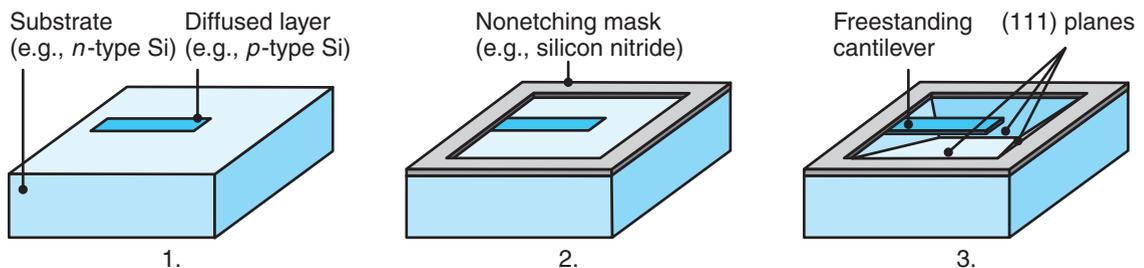


FIGURE 29.2 Schematic illustration of the steps in bulk micromachining. 1. Diffuse dopant in desired pattern. 2. Deposit and pattern-masking film. 3. Orientation-dependent etching (ODE) leaves behind a freestanding structure. *Source:* Courtesy of K.R. Williams.

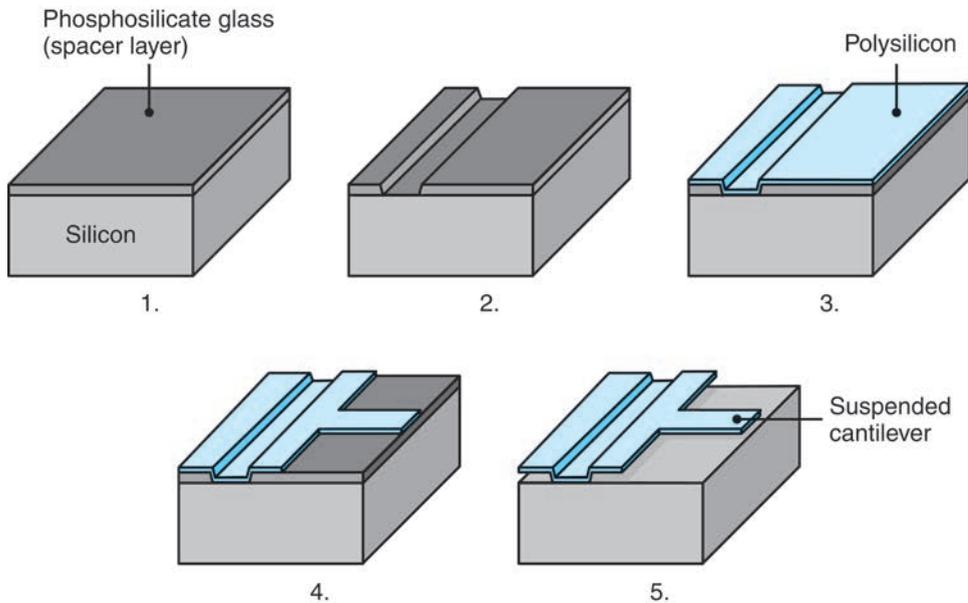


FIGURE 29.3 Schematic illustration of the steps in surface micromachining: 1. Deposition of a phosphosilicate glass (PSG) spacer layer. 2. Lithography and etching of spacer layer. 3. Deposition of polysilicon. 4. Lithography and etching of polysilicon. 5. Selective wet etching of PSG, leaving the silicon substrate and deposited polysilicon unaffected.

Figure 29.4 shows a microlamp that emits a white light when current passes through it; it has been produced through a combination of surface and bulk micromachining. The top patterned layer is a $2.2\text{-}\mu\text{m}$ layer of plasma-etched tungsten, forming a meandering filament and bond pad. The rectangular overhang is dry-etched silicon nitride. The steeply sloped layer is wet-hydrofluoric acid-etched phosphosilicate glass; the substrate is silicon, which is orientation-dependent etched.

The etchant used to remove the spacer layer must be selected carefully, as it must preferentially dissolve the spacer layer while leaving the dielectric, silicon, and structural film as intact as possible. With large features and narrow spacer layers, this task becomes very difficult, and etching can take many hours. To reduce the etching time, additional etched holes can be designed into the microstructures, to increase access of the etchant to the spacer layer.

Another difficulty that must be overcome is **stiction** after wet etching, which can be described by considering the situation illustrated in Fig. 29.5. After the spacer layer has been removed, the liquid etchant is dried from the wafer surface. A meniscus forms between the layers, resulting in capillary forces that can deform the film and cause contraction of the substrate as the liquid evaporates. Since adhesive forces are more significant at small length scales, it is possible that the film may *stick* permanently to the surface; thus, the desired three-dimensional features will not be produced.

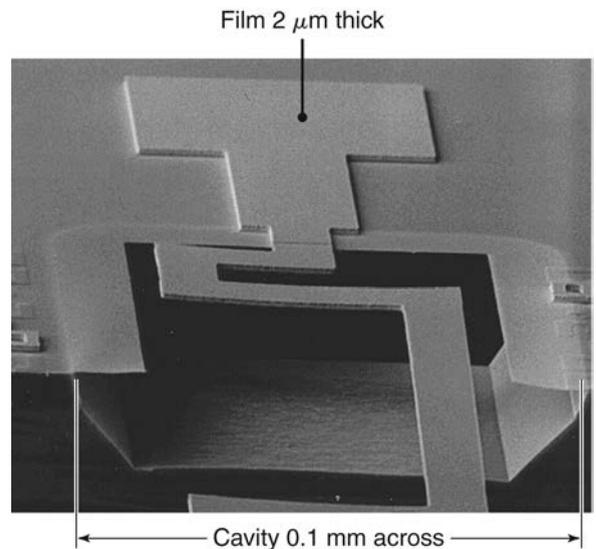


FIGURE 29.4 A microlamp produced from a combination of bulk and surface micromachining processes. *Source:* Courtesy of K.R. Williams.

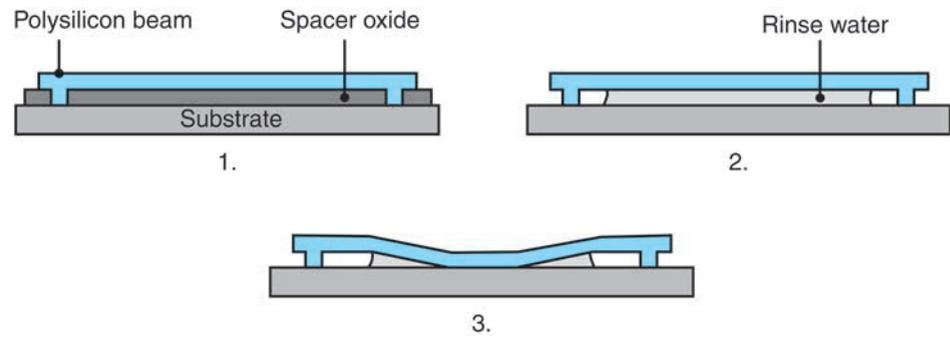


FIGURE 29.5 Stiction after wet etching: 1. Unreleased beam. 2. Released beam before drying. 3. Released beam pulled to the surface by capillary forces during drying. Once contact is made, interfacial adhesive forces prevent the beam from returning to its original shape. *Source:* After B. Bhushan.

EXAMPLE 29.1 Surface Micromachining of a Hinge

Surface micromachining is a widespread technology for the production of MEMS, with applications that include accelerometers, pressure sensors, micropumps, micromotors, actuators, and microscopic locking mechanisms. Often, these devices require very large vertical walls, which cannot be manufactured directly because the high vertical structure is difficult to deposit. This obstacle is overcome by machining large, flat horizontal structures, and then rotating or folding them into an upright position, as shown in Fig. 29.6.

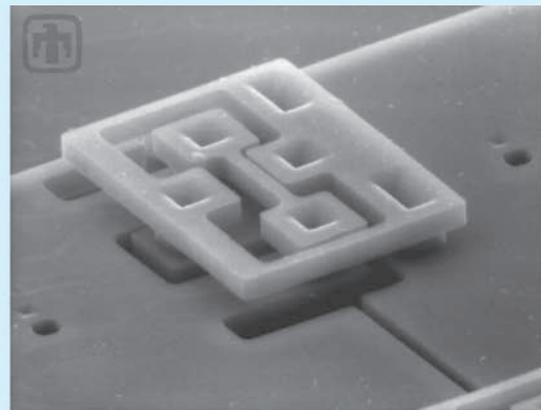
Figure 29.6a shows a micromirror that has been inclined with respect to the surface on which it was

manufactured; such systems can be used for reflecting light, that is, oblique to a surface, onto detectors or toward other sensors. It is apparent that a device which has such depth, and has the aspect ratio of the deployed mirror, is very difficult to machine directly. Instead, it is easier to surface micromachine the mirror along with a linear actuator, and then to fold the mirror into a deployed position. In order to do so, special hinges (as shown in Fig. 29.6b) are integrated into the design.

Figure 29.7 shows the cross-section of a hinge during its manufacture. The following steps are involved in the production of the hinges:



(a)



(b)

FIGURE 29.6 (a) SEM image of a deployed micromirror. (b) Detail of the micromirror hinge. *Source:* Courtesy of Sandia National Laboratories.

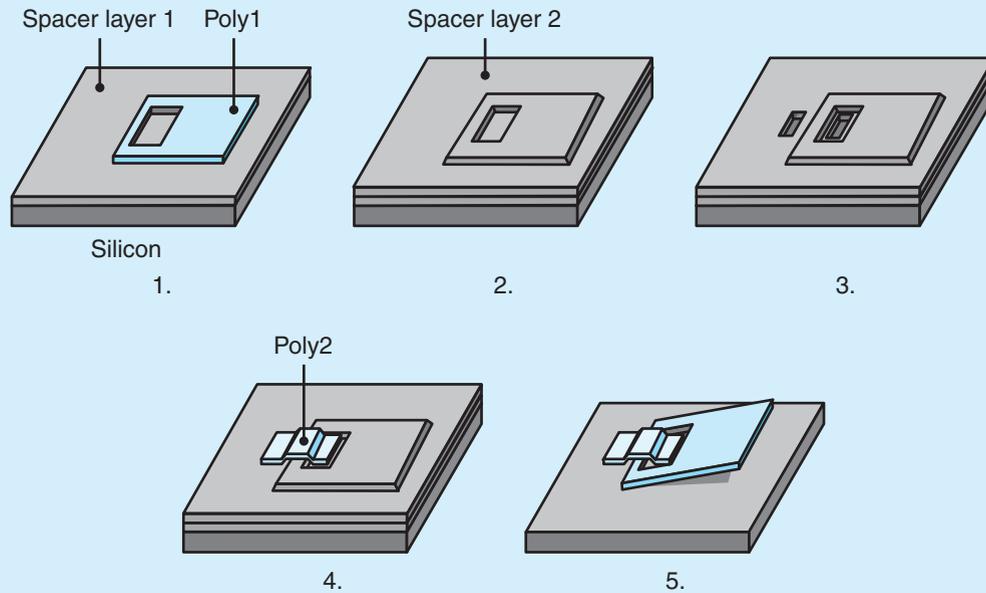


FIGURE 29.7 Schematic illustration of the steps required to manufacture a hinge. 1. Deposition of a phosphosilicate glass (PSG) spacer layer and polysilicon layer (see Fig. 29.3). 2. Deposition of a second spacer layer. 3. Selective etching of the PSG. 4. Deposition of polysilicon to form a staple for the hinge. 5. After selective wet etching of the PSG, the hinge can rotate.

1. A $2\text{-}\mu\text{m}$ -thick layer of phosphosilicate glass is first deposited onto the substrate material.
2. A $2\text{-}\mu\text{m}$ -thick layer of polysilicon (Poly1 in step 1 in Fig. 29.7) is deposited onto the PSG, patterned by photolithography, and dry etched to form the desired structural elements, including the hinge pins.
3. A second layer of sacrificial PSG, with a thickness of $0.5\ \mu\text{m}$, is deposited (step 2 in Fig. 29.7).
4. The connection locations are etched through both layers of PSG (step 3 in Fig. 29.7).
5. A second layer of polysilicon (Poly2 in step 4 in Fig. 29.7) is deposited, patterned, and etched.
6. The sacrificial layers of PSG are then removed by wet etching.

Hinges such as these have very high friction. Thus, if mirrors (as shown in Fig. 29.6) are manipulated manually and carefully with probe needles, they will remain in position. Often, such mirrors will be combined with linear actuators to precisely control their deployment.

CASE STUDY 29.1 Digital Micromirror Device

An example of a commercial MEMS-based product is the *digital pixel technology* (DPT) device, illustrated in Fig. 29.8. This device uses an array of *digital micromirror devices* (DMD) to project a digital image, as in movie theater projection systems or in nano projectors (Fig. 29.9). The aluminum mirrors can be tilted so that light is directed into or away from the optics that focus light onto a screen. That way, each mirror can represent a pixel of an

image's resolution. The mirror allows light or dark pixels to be projected, but levels of gray also can be accommodated. Since the switching time is about $15\ \mu\text{s}$ (which is much faster than the human eye can respond), the mirror will switch between the on and off states in order to reflect the proper dose of light to the optics.

The fabrication steps for producing the DMD device are shown in Fig. 29.10. This sequence is

(continued)

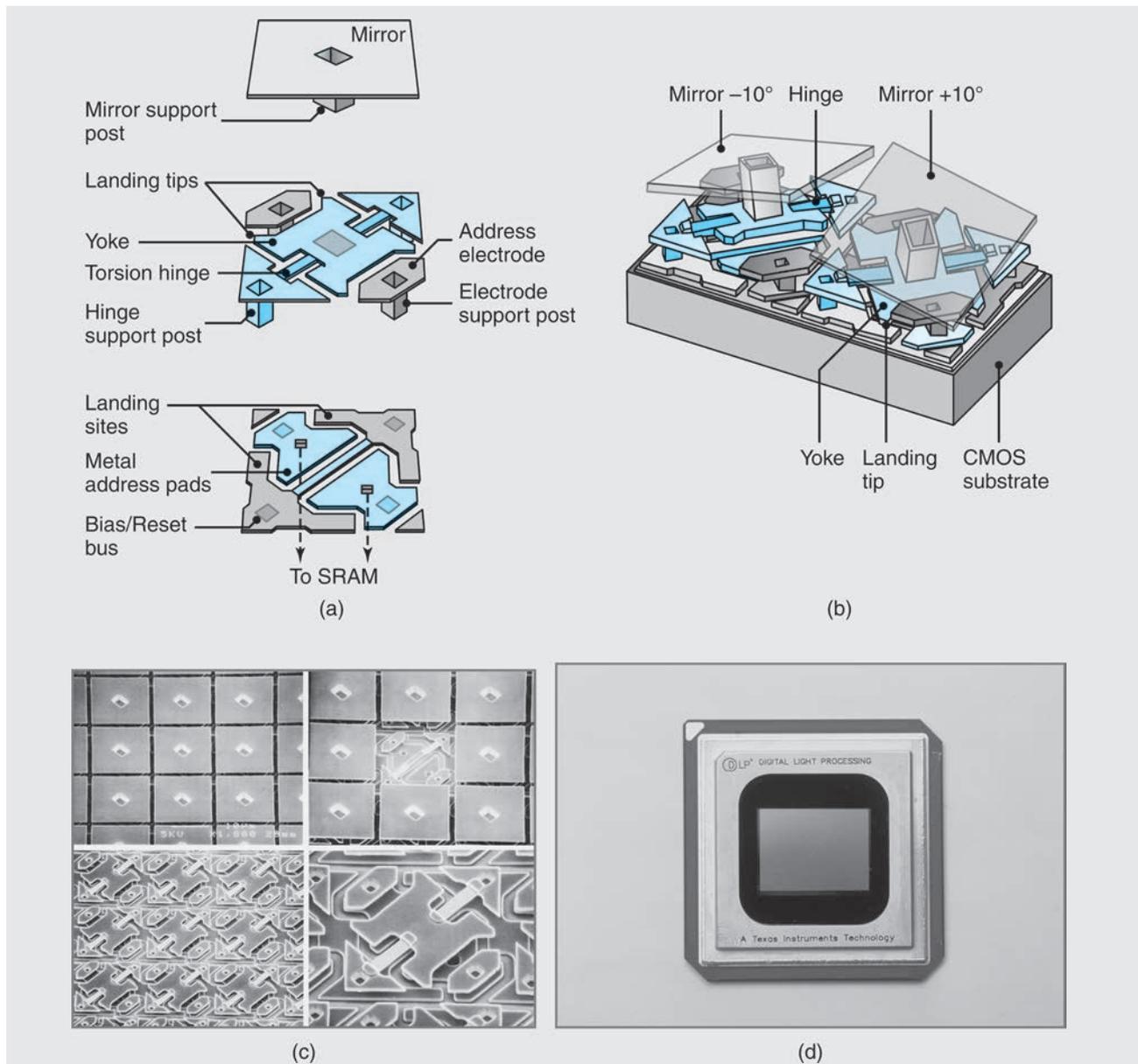


FIGURE 29.8 The Texas Instruments digital pixel technology (DPT) device. (a) Exploded view of a single digital micromirror device (DMD). (b) View of two adjacent DMD pixels. (c) Images of DMD arrays with some mirrors removed for clarity; each mirror measures approximately $17\ \mu\text{m}$ ($670\ \mu\text{in.}$) on a side. (d) A typical DPT device used for digital projection systems, high-definition televisions, and other image display systems. The device shown contains 1,310,720 micromirrors and measures less than 50 mm (2 in.) per side. *Source:* Courtesy of Texas Instruments.

similar to that of other surface micromachining operations, but has the following important differences:

- All micromachining steps take place at temperatures below 400°C , which is sufficiently low to

ensure that no damage occurs to the electronic circuit.

- A thick silicon-dioxide layer is deposited and is chemical-mechanical polished (Section 26.7) to



FIGURE 29.9 A prototype pico projector based on DPT.
Source: Courtesy of Texas Instruments Corp.

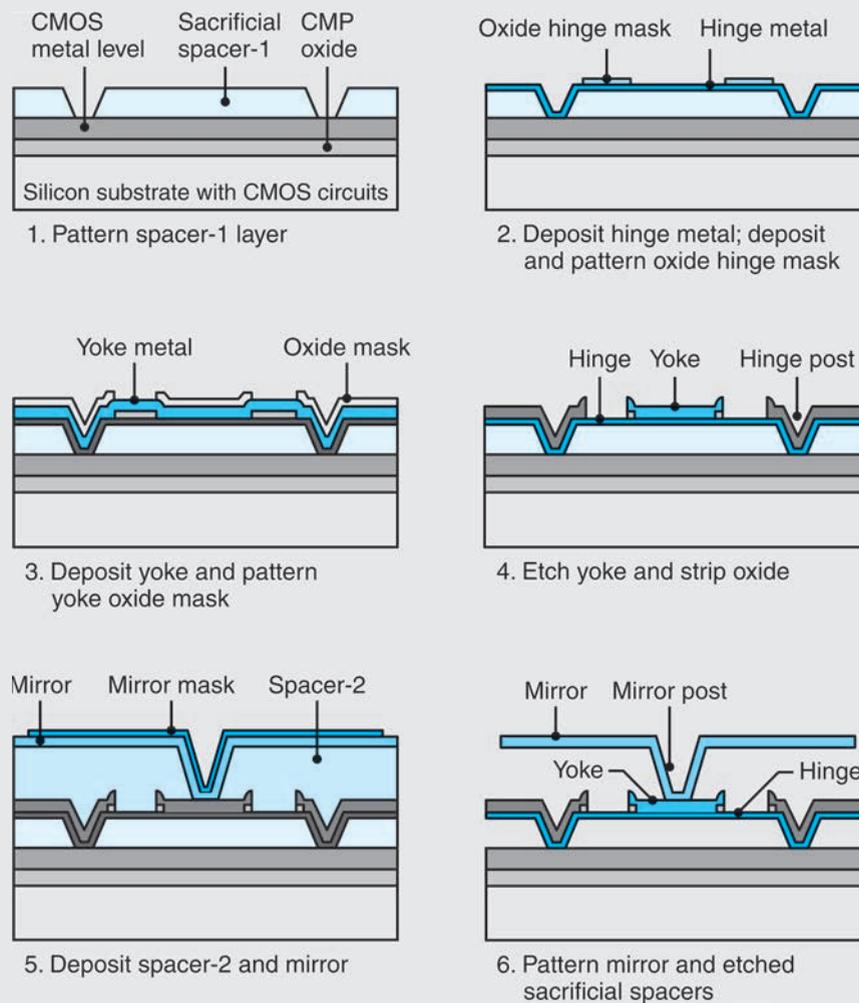


FIGURE 29.10 Manufacturing sequence for the Texas Instruments DMD device.

(continued)

provide an adequate foundation for the MEMS device.

- The landing pads and electrodes are produced from aluminum, which is deposited by sputtering.
- High reliability requires low stresses and high strength in the torsional hinge, which is produced from a proprietary aluminum alloy.
- The MEMS portion of the DMD is very delicate, and special care must be taken in separating the dies. When completed, a wafer saw (see Fig. 28.6c) cuts a trench along the edges of the DMD, which allows the individual dice to be broken apart at a later stage.
- A special step deposits a layer that prevents adhesion between the yoke and landing pads.

- The DMD is placed in a hermetically sealed ceramic package (Fig. 29.11) with an optical window.

An array of such mirrors represents a grayscale screen. Using three mirrors (one each for red, green, and blue light) for each pixel results in a color image with millions of discrete colors. Digital pixel technology is widely applied in digital projection systems, high-definition television, and other optical equipment. However, to produce the device shown in Fig. 29.8 requires much more than two-and-one-half-dimensional features, thus full three-dimensional, multipart assemblies have to be manufactured.

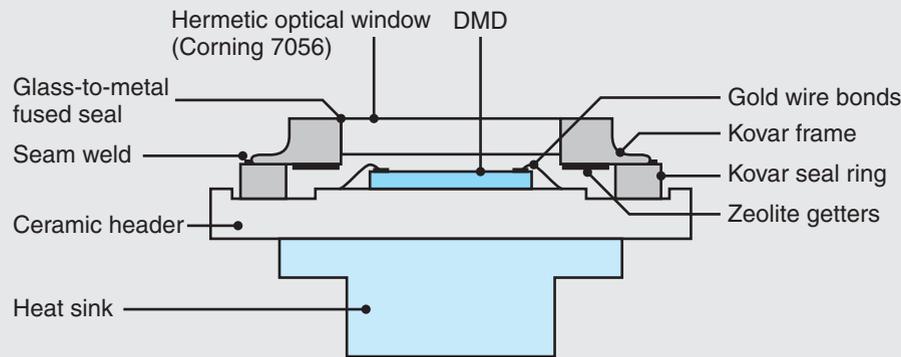


FIGURE 29.11 Ceramic flat-package construction used for the DMD device.

SCREAM. Another method for making very deep MEMS structures is the SCREAM (*single-crystal silicon reactive etching and metallization*) process, depicted in Fig. 29.12. In this technique, standard lithography and etching processes produce trenches 10–50 μm (400–2000 $\mu\text{in.}$) deep, which are then protected by a layer of chemically vapor deposited silicon oxide. An anisotropic-etching step removes the oxide only at the bottom of the trench, and the trench is then extended through dry etching. An isotropic etching step (using sulfur hexafluoride, SF_6) laterally etches the exposed sidewalls at the bottom of the trench. This undercut (when it overlaps adjacent undercuts) releases the machined structures.

SIMPLE. An alternative to SCREAM is SIMPLE (*silicon micromachining by single-step plasma etching*), as depicted in Fig. 29.13. This technique uses a chlorine-gas-based plasma-etching process that machines *p*-doped or lightly doped silicon anisotropically, but heavily *n*-doped silicon isotropically. A suspended MEMS device can thus be produced in one plasma-etching device, as shown in the figure.

Some of the concerns with the SIMPLE process are:

- The oxide mask is machined, although at a slower rate, by the chlorine-gas plasma; therefore, relatively thick oxide masks are required.

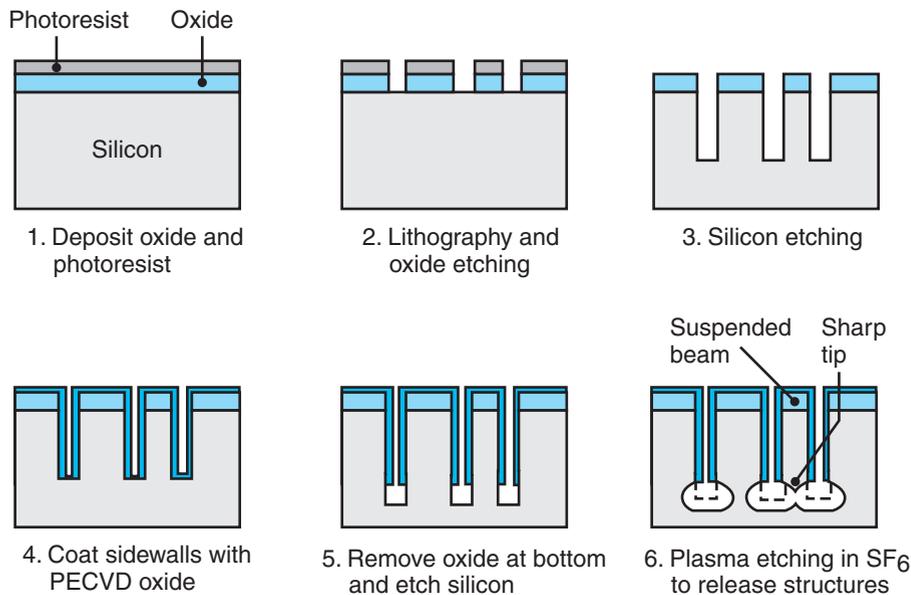


FIGURE 29.12 Steps in the SCREAM process. *Source:* After N. Maluf.

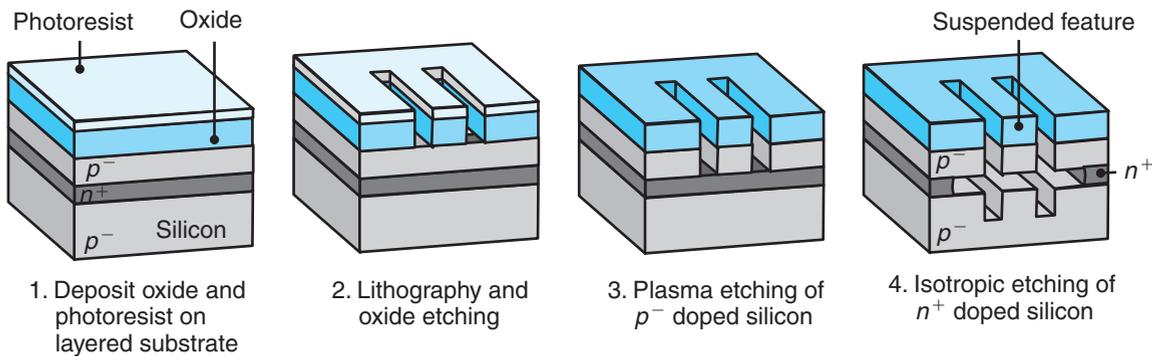


FIGURE 29.13 Schematic illustration of silicon micromachining by the single-step plasma etching (SIMPLE) process.

- The isotropic etch rate is low, typically 50 nm/min; consequently, this is a very slow process.
- The layer beneath the structures will have developed deep trenches, which may affect the motion of free-hanging structures.

Etching Combined with Diffusion Bonding. Tall structures can be produced in crystalline silicon through a combination of *silicon-diffusion bonding and deep reactive-ion etching* (SFB–DRIE), as illustrated in Fig. 29.14. First, a silicon wafer is prepared with an insulating oxide layer, with the deep trench areas defined by a standard lithography procedure. This step is followed by conventional wet or dry etching to form a large cavity. A second layer of silicon is then fusion bonded to the oxide layer; the second silicon layer can be ground and lapped to the desired

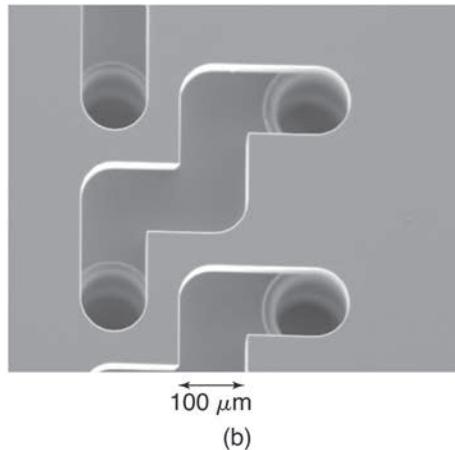
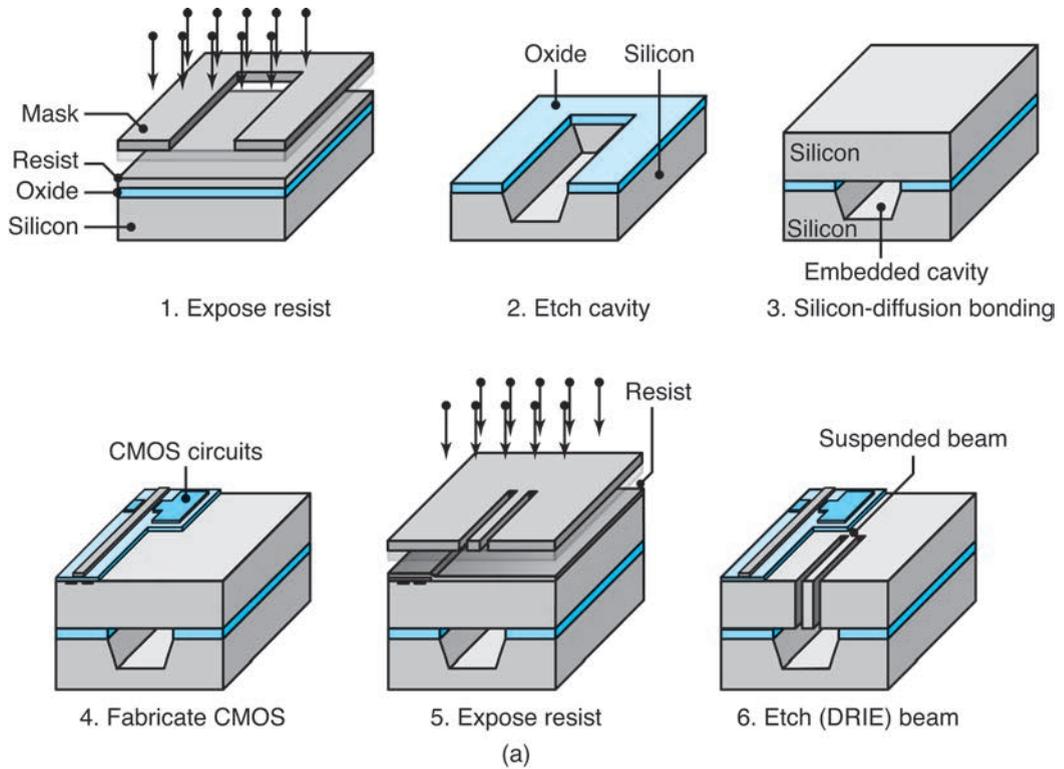


FIGURE 29.14 (a) Schematic illustration of silicon-diffusion bonding combined with deep reactive-ion etching to produce large, suspended cantilevers. (b) A microfluid-flow device manufactured by DRIE etching two separate wafers and then aligning and silicon-fusion bonding them together. Afterward, a Pyrex[®] layer (not shown) is anodically bonded over the top to provide a window to observe fluid flow. *Source:* (a) After N. Maluf. (b) Courtesy of K.R. Williams.

thickness, if necessary. At this stage, integrated circuitry is manufactured through the steps outlined in Fig. 28.2. A protective resist is applied and exposed, and the desired trenches are then etched by deep reactive-ion etching to the cavity in the first layer of silicon.

EXAMPLE 29.2 Operation and Fabrication Sequence for a Thermal Ink-jet Printer

Thermal ink-jet printers are among the most successful applications of MEMS to date. These printers operate by ejecting nano- or picoliters (10^{-12} l) of ink from a nozzle toward the paper. Ink-jet printers use a variety of designs, but silicon-machining technology is most applicable to high-resolution printers. Note that a resolution of 1200 dpi requires a nozzle spacing of approximately $20\ \mu\text{m}$.

The mode of operation of an ink-jet printer is shown in Fig. 29.15. When an ink droplet is to be generated and expelled, a tantalum resistor (placed below a nozzle) is heated, which makes a thin film of ink form a bubble within $5\ \mu\text{s}$, with internal pressures reaching $1.4\ \text{MPa}$ ($200\ \text{psi}$). The bubble then expands rapidly, and as a result, the fluid is forced rapidly out of the nozzle. Within $24\ \mu\text{s}$, the tail of the ink-jet droplet separates because of surface tension, the heat source is turned off, and the bubble collapses inside the nozzle. Within $50\ \mu\text{s}$, sufficient ink has been drawn into the nozzle from a reservoir to form the desired meniscus for the next droplet.

Traditional ink-jet printer heads have been made with electroformed nickel nozzles, produced

separately from the integrated circuitry, thus requiring a bonding operation to attach these two components. With increasing printer resolution, it is more difficult to bond the components with a tolerance of less than a few micrometers. For this reason, single-component, or monolithic, fabrication is of interest.

The fabrication sequence for a monolithic ink-jet printer head is shown in Fig. 29.16. A silicon wafer is first prepared and coated with a phosphosilicate-glass (PSG) pattern and a low-stress silicon-nitride coating. The ink reservoir is obtained by isotropically etching the back side of the wafer, followed by PSG removal and enlargement of the reservoir. The required CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) controlling circuitry is then produced, and a tantalum heater pad is deposited. The aluminum interconnection between the tantalum pad and the CMOS circuit is formed, and the nozzle is produced through laser ablation. An array of such nozzles can be placed inside an ink-jet printing head, and resolutions of 2400 dpi or higher can be achieved.

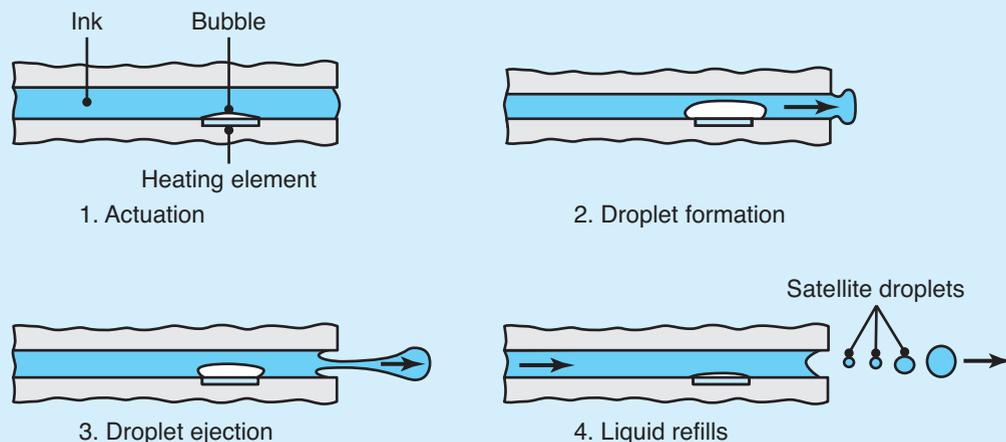


FIGURE 29.15 Sequence of operation of a thermal ink-jet printer. 1. Resistive heating element is turned on, rapidly vaporizing ink and forming a bubble. 2. Within $5\ \mu\text{s}$, the bubble has expanded and displaced liquid ink from the nozzle. 3. Surface tension breaks the ink stream into a bubble, which is discharged at high velocity; the heating element is turned off at this time, so that the bubble collapses as heat is transferred to the surrounding ink. 4. Within $24\ \mu\text{s}$ an ink droplet (and some undesirable satellite droplets) are ejected, and surface tension of the ink draws more liquid from the reservoir. *Source:* After F.-G. Tseng.

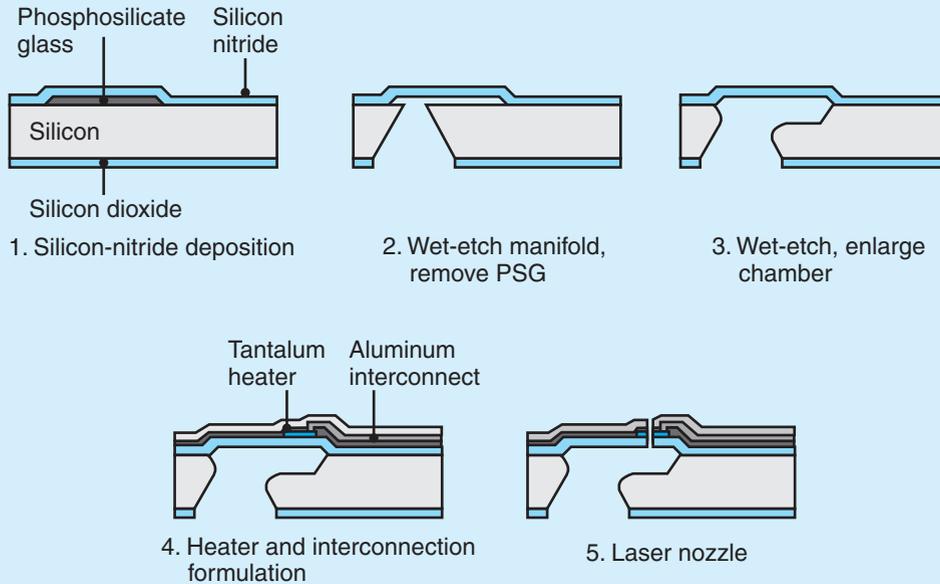


FIGURE 29.16 The manufacturing sequence for producing thermal ink-jet printer heads.
Source: After F.-G. Tseng.

29.3 Electroforming-based Processes

29.3.1 LIGA

LIGA is a German acronym for the combined processes of X-ray lithography, electro-deposition, and molding (in German, X-ray *lithographie*, *galvanoformung*, und *abformung*). A schematic illustration of this process is given in Fig. 29.17.

The LIGA process involves the following steps:

1. A relatively thick (up to hundreds of micrometers) resist layer of polymethyl-methacrylate (PMMA) is deposited onto a primary substrate.
2. The PMMA is exposed to columnated X-rays and is developed.
3. Metal is electrodeposited onto the primary substrate.
4. The PMMA is removed or stripped, resulting in a freestanding metal structure.
5. Plastic is injection-molded into the metal structure.

Depending on the application, the final product from a LIGA process may consist of one of the following:

- A freestanding metal structure, resulting from the electrodeposition process
- A plastic injection-molded structure
- An investment-cast metal part, using the injection-molded structure as a blank
- A slip-cast ceramic part, produced using the injection-molded parts as the molds

The substrate used in LIGA is a conductor or a conductor-coated insulator. Examples of primary substrate materials include austenitic steel plate, silicon wafers with a titanium layer, and copper plated with gold, titanium, or nickel. Metal-plated

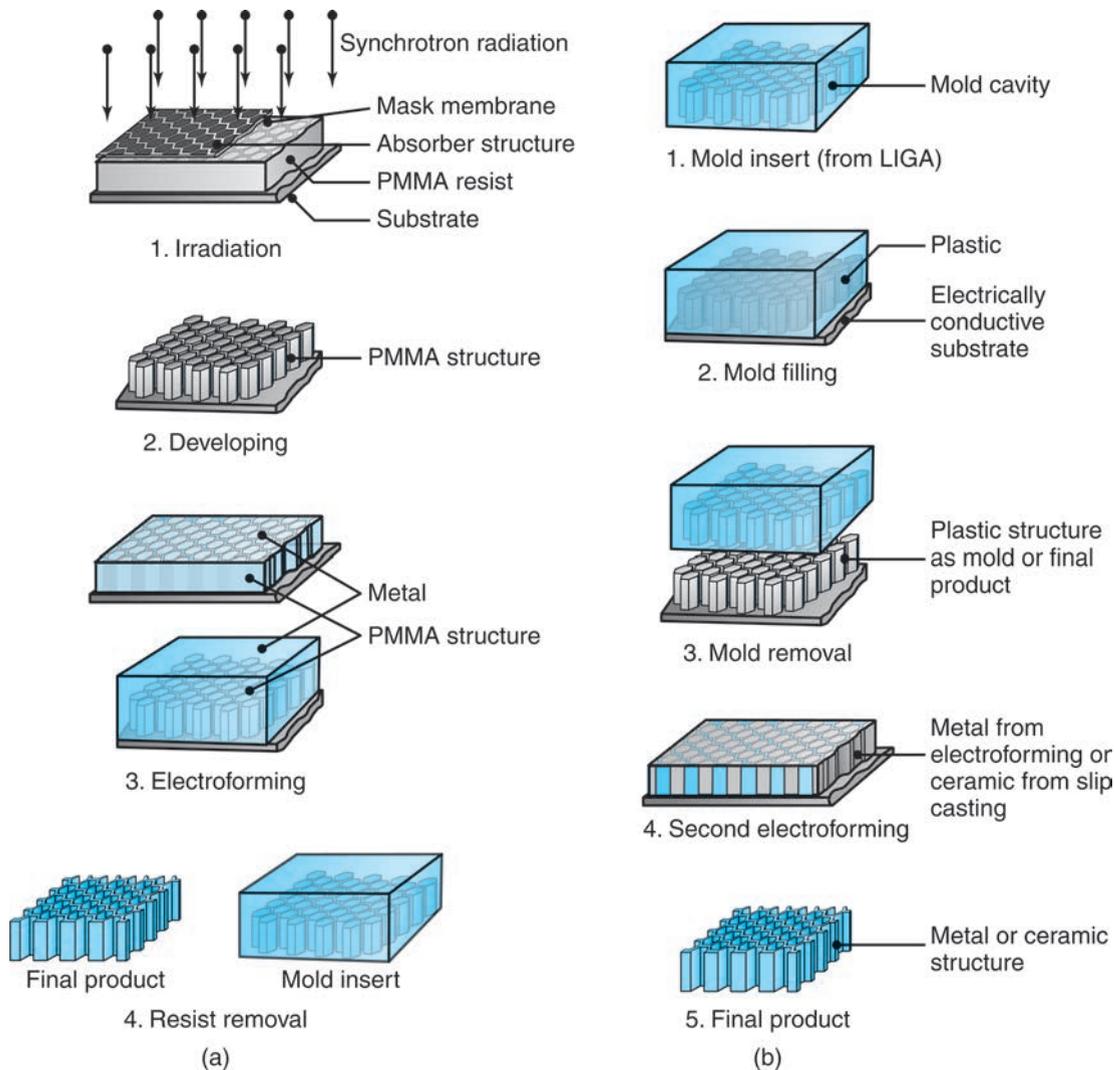


FIGURE 29.17 The LIGA (lithography, electrodeposition, and molding) technique. (a) Primary production of a metal final product or mold insert. (b) Use of the primary part for secondary operations or replication. *Source:* Based on data from IMM Institut für Mikrotechnik, Mainz, Germany.

ceramic and glass also have been used. The surface may be roughened by grit blasting to encourage good adhesion of the resist material.

Resist materials must have high X-ray sensitivity, dry- and wet-etching resistance when unexposed, and thermal stability. The most common resist material is polymethylmethacrylate, which has a very high molecular weight (more than 10^6 per mole; Section 7.2). The X-rays break the chemical bonds, leading to the production of free radicals and to a significantly reduced molecular weight in the exposed region. Organic solvents then preferentially dissolve the exposed PMMA in a wet-etching process. After development, the remaining three-dimensional structure is rinsed and dried, or it is spun and blasted with dry nitrogen.

Two newer forms of LIGA are **UV-LIGA** and **Silicon-LIGA**. In *UV-LIGA*, special photoresists are used, instead of PMMA, and they are exposed through

ultraviolet lithography (Section 28.7). *Silicon-LIGA* uses deep reactive-ion-etched silicon (Section 28.8.2) as a preform for further operations. These processes, like the traditional X-ray-based LIGA, are used to replicate MEMS devices, but, unlike LIGA, they do not require the expensive columnated X-ray source for developing their patterns.

The electrodeposition of metal usually involves the electroplating of nickel (Section 34.9). The nickel is deposited onto exposed areas of the substrate; it fills the PMMA structure and can even coat the resist (Fig. 29.17a). Nickel is the preferred material because of the relative ease in electroplating with well-controlled deposition rates. Electroless plating of nickel also is possible, and the nickel can be deposited directly onto electrically insulating substrates. However, because nickel displays high wear rates in MEMS, significant research is being directed toward the use of other materials or coatings.

After the metal structure has been deposited, precision grinding removes either the substrate material or a layer of the deposited nickel. The process is referred to as *planarization* (Section 28.10). The need for planarization is obvious when it is recognized that three-dimensional MEMS devices require micrometer tolerances, on layers many hundreds of micrometers thick. Planarization is difficult to achieve, because conventional lapping leads to preferential removal of the soft PMMA and smearing of the metal. Planarization usually is accomplished with a diamond-lapping procedure (Section 26.7) referred to as *nanogrinding*. Here, a diamond-slurry-loaded, soft metal plate is used to remove material in order to maintain flatness within $1\ \mu\text{m}$ ($40\ \mu\text{in.}$) over a 75-mm (3-in.) diameter substrate.

If cross-linked, the PMMA resist is then exposed to synchrotron X-ray radiation, and removed by exposure to an oxygen plasma or through solvent extraction. The result is a metal structure, which may be processed further. Examples of freestanding metal structures produced through the electrodeposition of nickel are shown in Fig. 29.18.

The processing steps used to make freestanding metal structures are time consuming and expensive. The main advantage of LIGA is that these structures serve as molds for the rapid replication of submicron features through molding operations. The processes that can be used for producing micromolds are shown and compared in Table 29.1, where it can be seen that LIGA provides some clear advantages. Reaction injection molding, injection molding, and compression molding (described in Chapter 19) also have been used to make the micromolds.

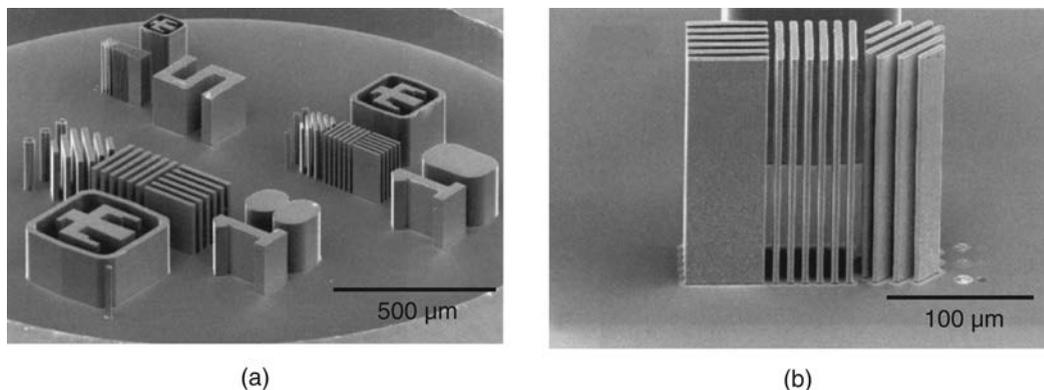


FIGURE 29.18 (a) Electroformed 200- μm -tall nickel structures and (b) detail of nickel lines and spaces. *Source:* Courtesy of T. Christenson, Sandia National Laboratories.

TABLE 29.1

Comparison of Micromold Manufacturing Techniques

Characteristic	Production technique		
	LIGA	Laser machining	EDM
Aspect ratio	10–50	10	up to 100
Surface roughness	<50 nm	100 nm	0.3–1 μm
Accuracy	<1 μm	1–3 μm	1–5 μm
Mask required	Yes	No	No
Maximum height	1–500 μm	200–500 μm	μm to mm

Source: After L. Weber, W. Ehrfeld, H. Freimuth, M. Lacher, M. Lehr, P. Pech, and K.R. Williams.

EXAMPLE 29.3 Production of Rare-earth Magnets

A number of scaling issues in electromagnetic devices indicate that there is an advantage in using rare-earth magnets from the samarium cobalt (SmCo) and neodymium iron boron (NdFeB) families, which are available in powder form. These alloys are of interest because they can produce magnets that are one order of magnitude more powerful than conventional magnets (Table 29.2). Such materials can be used when effective miniature electromagnetic transducers are to be produced.

The processing steps involved in manufacturing these magnets are shown in Fig. 29.19. The PMMA mold is produced by exposure to X-ray radiation and solvent extraction. The rare-earth powders are mixed with a binder of epoxy and applied to

TABLE 29.2

Comparison of Properties of Permanent-magnet Materials

Material	Energy product (Gauss–Oersted $\times 10^{-6}$)
Carbon steel	0.20
36% Cobalt steel	0.65
Alnico I	1.4
Vicalloy I	1.0
Platinum–cobalt	6.5
Nd ₂ Fe ₁₄ B, fully dense	40
Nd ₂ Fe ₁₄ B, bonded	9

Source: Courtesy of T. Christenson, Sandia National Laboratories.

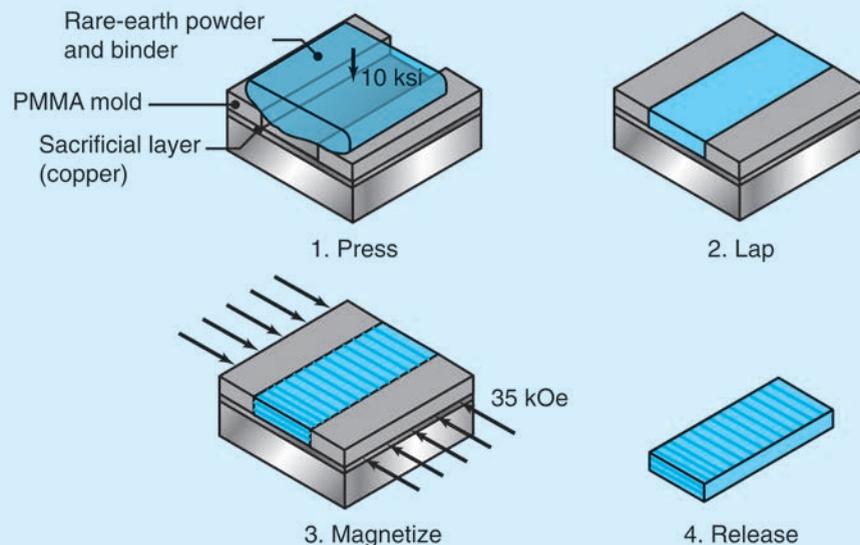


FIGURE 29.19 Fabrication process used to produce rare-earth magnets for microsensors. Source: Courtesy of T. Christenson, Sandia National Laboratories.

the mold through a combination of calendaring (see Fig. 19.22) and pressing. After curing in a press at a pressure around 70 MPa (10 ksi), the substrate is planarized. The substrate is then subjected to a magnetizing field, of at least 35 kilo-oersteds (kOe),

in the desired orientation. Once the material has been magnetized, the PMMA substrate is dissolved, leaving behind the rare-earth magnets, as shown in Fig. 29.20.

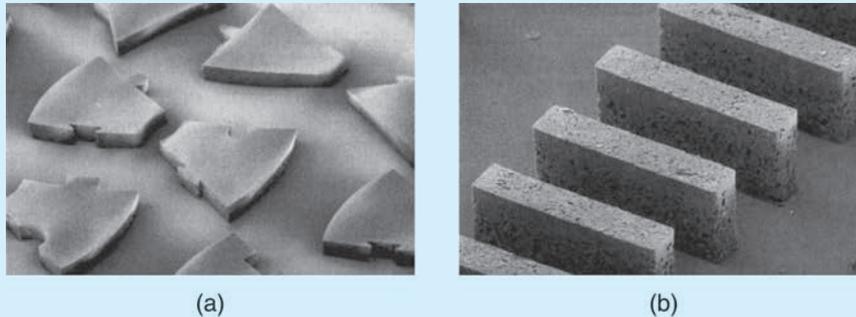


FIGURE 29.20 SEM images of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ permanent magnets. The powder particle size ranges from 1 to $5\ \mu\text{m}$, and the binder is a methylene-chloride-resistant epoxy. Mild distortion is present in the image due to magnetic perturbation of the imaging electrons. Maximum energy products of 9 MGOe have been obtained with this process. *Source:* Courtesy of T. Christenson, Sandia National Laboratories.

29.3.2 Multilayer X-Ray Lithography

The LIGA technique is very powerful for producing MEMS devices with large aspect ratios and reproducible shapes. It is, however, often useful to obtain a multilayer stepped structure that cannot be made directly through LIGA. For nonoverlapping part geometries, direct plating can be applied. In this technique, a layer of electro-deposited metal with surrounding PMMA is produced, as previously described. A second layer of PMMA resist is then bonded to this structure and X-ray exposed, using an aligned X-ray mask.

Often, it is useful to have overhanging geometries within complex MEMS devices. A batch diffusion-bonding and release procedure has been developed for this purpose, as schematically illustrated in Fig. 29.21a. This process involves the preparation of two PMMA patterned and electroformed layers, with the PMMA subsequently removed. The wafers are then aligned, face to face, with guide pins that press-fit into complementary structures on the opposite surface. Finally, the substrates are joined in a hot press, and a sacrificial layer on one substrate is etched away, leaving behind one layer bonded to the other. An example of such a structure is shown in Fig. 29.21b.

29.3.3 HEXSIL

This process, illustrated in Fig. 29.21, combines *hexagonal* honeycomb structures, *silicon* micromachining, and thin-film deposition to produce high-aspect-ratio, free-standing structures. HEXSIL can produce tall structures, with a shape definition that rivals that of structures produced by LIGA.

In HEXSIL, a deep trench is first produced in single-crystal silicon by dry etching, followed by shallow wet etching to make the trench walls smoother. The depth

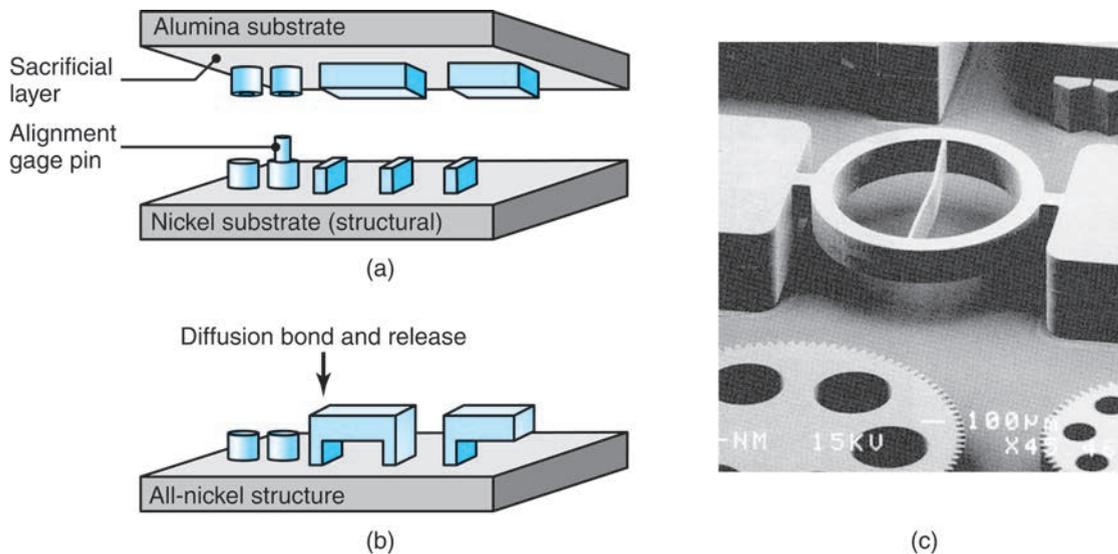


FIGURE 29.21 Multilevel MEMS fabrication through wafer-scale diffusion bonding. (a) Two wafers are aligned and assembled. (b) Resultant structure after diffusion bonding and removal of alumina substrate. (c) A suspended ring structure for measurement of tensile strain, formed by two-layer wafer-scale diffusion bonding. *Source:* (c) Courtesy of T. Christenson, Sandia National Laboratories.

of the trench matches the desired structure height, and is limited practically to around $100\ \mu\text{m}$. An oxide layer is then grown or deposited onto the silicon, followed by an undoped-polycrystalline silicon layer, which results in good mold filling and shape definition. A doped-silicon layer then follows, providing a resistive portion of the microdevice. Electroplated or electroless nickel plating is then deposited. Figure 29.22 shows various trench widths to demonstrate the different structures that can be produced in HEXSIL.

Microscale tweezers produced through the HEXSIL process are shown in Fig. 29.23. A thermally activated bar activates the tweezers, which have been used for microassembly and microsurgery applications.

29.3.4 MolTun

This process (short for *molding of tungsten*) was developed in order to utilize the higher mass of tungsten in micromechanical devices and systems. In MolTun, a sacrificial oxide is patterned through lithography and then etched, but instead of electroforming, a layer of tungsten is deposited through chemical vapor deposition. Excess tungsten is then removed by chemical–mechanical polishing, which also ensures good control over layer thickness. Multiple layers of tungsten can be deposited to develop intricate geometries (Fig. 29.24).

MolTun has been used for micro mass-analysis systems and a large number of micro-scale latching relays, which take advantage of tungsten's higher strength compared to other typical MEMS materials. The depth of MolTun structures can be significantly larger than those produced through silicon micromachining; the mass analysis array in Fig. 29.24, for example, has a total thickness of around $25\ \mu\text{m}$.

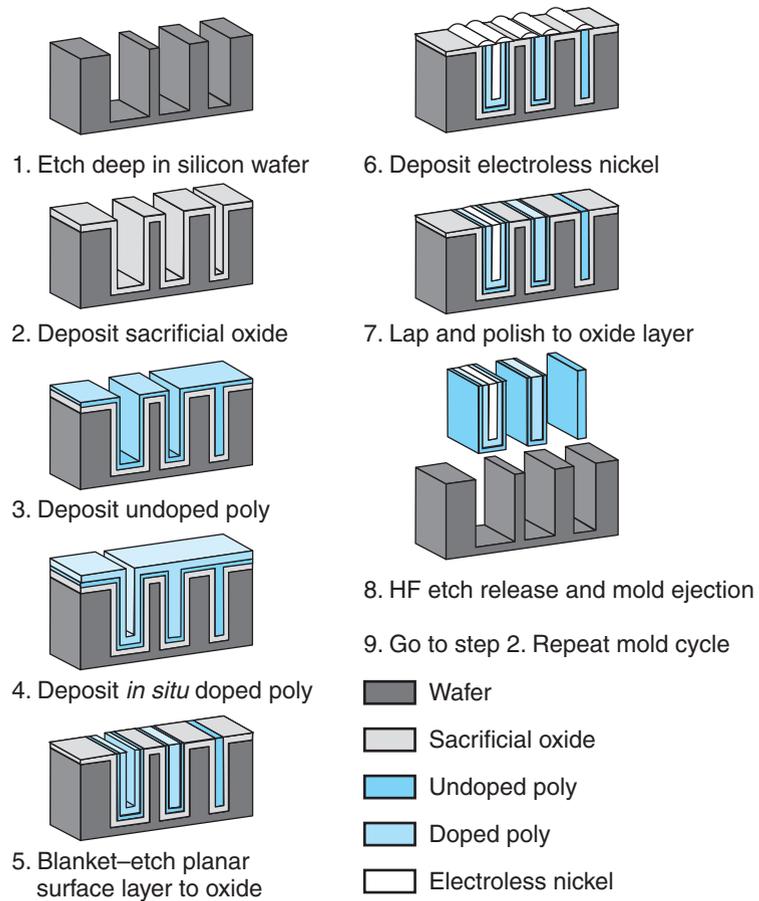


FIGURE 29.22 Illustration of the hexagonal honeycomb structure, silicon micromachining, and thin-film deposition (the HEXSIL process).

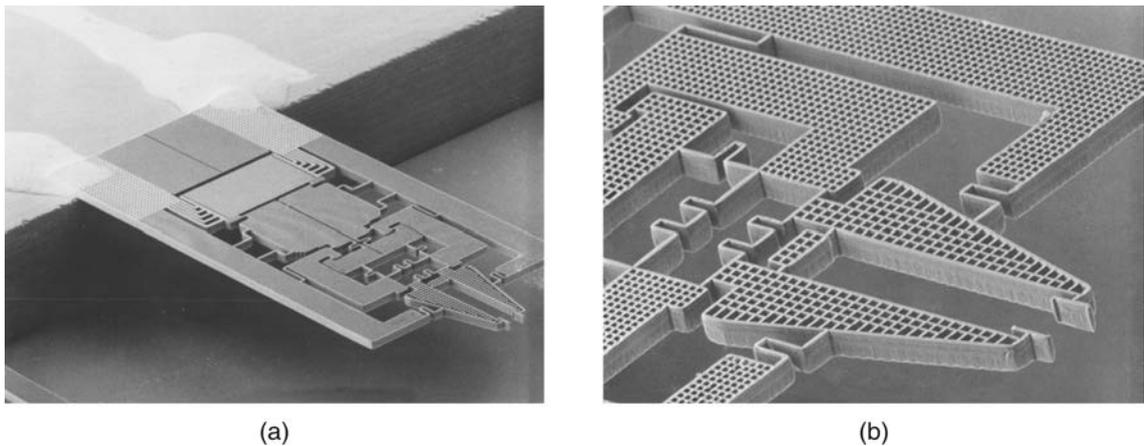


FIGURE 29.23 (a) SEM image of microscale tweezers used in microassembly and microsurgery applications. (b) Detailed view of gripper. *Source:* Courtesy of MEMS Precision Instruments.

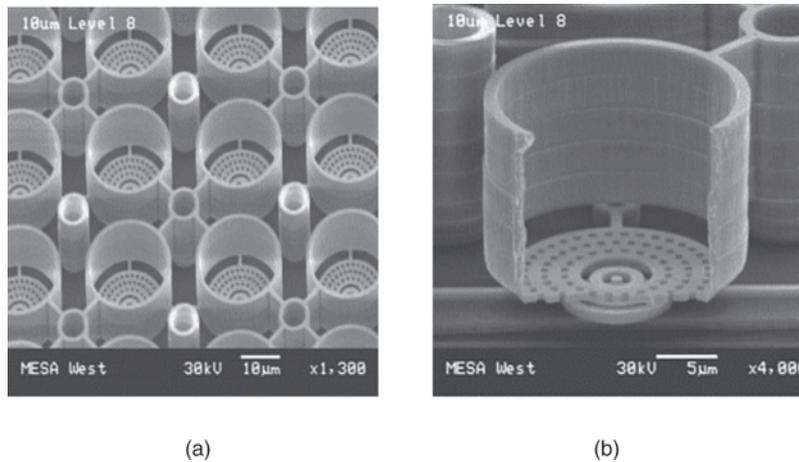


FIGURE 29.24 An array of micro-mass analysis systems consisting of cylindrical ion traps, constructed of 14 layers of molded tungsten, including 8 layers for the ring electrode. *Source:* Courtesy of Sandia National Laboratories.

29.4 Solid Free-form Fabrication of Devices

Solid free-form fabrication is another term for *rapid prototyping*, as described in Chapter 20. This method is unique in that complex three-dimensional structures are produced through additive manufacturing, as opposed to material removal. Many of the advances in rapid prototyping also are applicable to MEMS manufacture for processes with sufficiently high resolution. *Stereolithography* (Section 20.3.2) involves curing a liquid thermosetting polymer, using a photoinitiator and a highly focused light source. Conventional stereolithography uses layers between 75 and 500 μm in thickness, with a laser dot focused to a diameter of 0.05–0.25 mm.

Microstereolithography. *Microstereolithography* uses the same basic approach as stereolithography; however, there are some important differences between the two processes, including the following:

- The laser is more highly focused, to a diameter as small as 1 μm , as compared with 10 to over 100 μm in stereolithography.
- Layer thicknesses are around 10 μm , which is an order of magnitude smaller than in stereolithography.
- The photopolymers used must have much lower viscosities, to ensure the formation of uniform layers.
- Support structures are not required in microstereolithography, since the smaller structures can be supported by the fluid.
- Parts with significant metal or ceramic content can be produced, by suspending nanoparticles in the liquid photopolymer.

The microstereolithography technique has several cost advantages, but the MEMS devices made by this method are difficult to integrate with the controlling circuitry.

Electrochemical Fabrication. The solid free-form fabrication of MEMS devices using instant masking is known as *electrochemical fabrication* (EFAB). Instant masking is one EFAB technique for producing MEMS devices (Fig. 29.25). A mask of

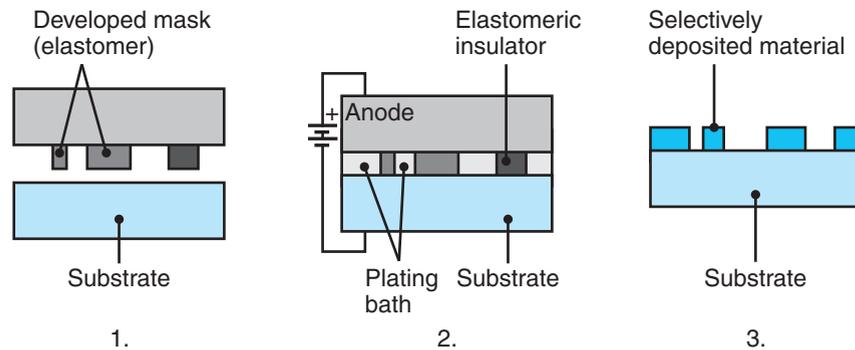


FIGURE 29.25 The instant-masking process: 1. Bare substrate. 2. During deposition, with the substrate and instant mask in contact. 3. The resulting pattern deposited. *Source:* Courtesy of Microfabrica.

elastomeric material is first produced through conventional photolithography techniques, described in Section 28.7. The mask is pressed against the substrate in an electrodeposition bath, so that the elastomer conforms to the substrate and excludes the plating solution in contact areas. Electrodeposition takes place in areas that are not masked, eventually producing a mirror image of the mask. By using a sacrificial filler, made of a second material, instant masking technology can produce complex three-dimensional shapes complete with overhangs, arches, and other features.

CASE STUDY 29.2 Accelerometer for Automotive Air Bags

Accelerometers based on lateral resonators represent the largest commercial application of surface micromachining today, and are used widely as sensors for automotive air-bag deployment systems. The sensor portion of such an accelerometer is shown in Fig. 29.26. A central mass is suspended over the substrate, but anchored through four slender beams, which act as springs to center the mass under static-equilibrium conditions. An acceleration of the car causes the mass to deflect, reducing or increasing the clearance between the fins on the mass and the stationary fingers on the substrate.

By measuring the electrical capacitance between the mass and fins, the deflection of the mass (and therefore the acceleration or deceleration of the system) can be directly measured. Figure 29.26 shows an arrangement for the measurement of acceleration in one direction, but commercial sensors employ several masses so that accelerations can be measured in multiple directions simultaneously.

Figure 29.27 shows a 50-g surface micromachined accelerometer (ADXL-50), with onboard signal conditioning and self-diagnostic electronics. The polysilicon sensing element (visible in the center of the die) occupies only 5% of the total die area, and the whole chip measures $500\ \mu\text{m} \times 625\ \mu\text{m}$ ($20\ \mu\text{in.} \times 25\ \mu\text{in.}$). The mass is approximately $0.3\ \mu\text{g}$, and the sensor has a measurement accuracy of 5% over the $\pm 50\text{-g}$ range.

Fabrication of the accelerometer proved to be a challenge, since it required a *complementary metal-oxide-semiconductor* (CMOS) fabrication sequence to be integrated closely with a surface micromachining approach. Analog Devices, Inc., was able to modify a CMOS production technique to directly incorporate surface micromachining. In the sensor design, the $n+$ doped silicon underpasses connect the sensor area to the electronic circuitry, replacing the usual heat-sensitive aluminum connect lines. Most of the sensor processing is inserted into the

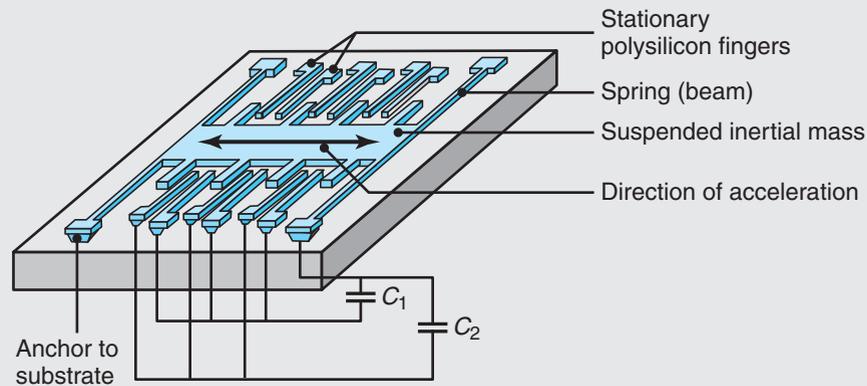


FIGURE 29.26 Schematic illustration of a microacceleration sensor. *Source:* After N. Maluf.

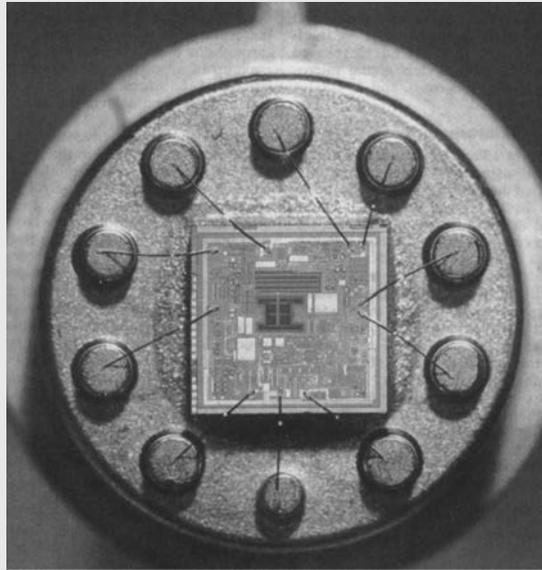


FIGURE 29.27 Photograph of Analog Devices' ADXL-50 accelerometer with a surface micromachined capacitive sensor (center), on-chip excitation, and self-test and signal-conditioning circuitry. The entire chip measures 0.500 mm \times 0.625 mm. *Source:* After R.A. Core.

fabrication process right after a borosilicate-glass planarization process.

After the planarization, a designated sensor region, or *moat*, is cleared in the center of the die

(step 1 in Fig. 29.28). A thin oxide is then deposited to passivate the $n+$ underpass connects, followed by a thin, low-pressure chemical-vapor deposited (LPCVD) nitride to act as an etch stop for the final

(continued)

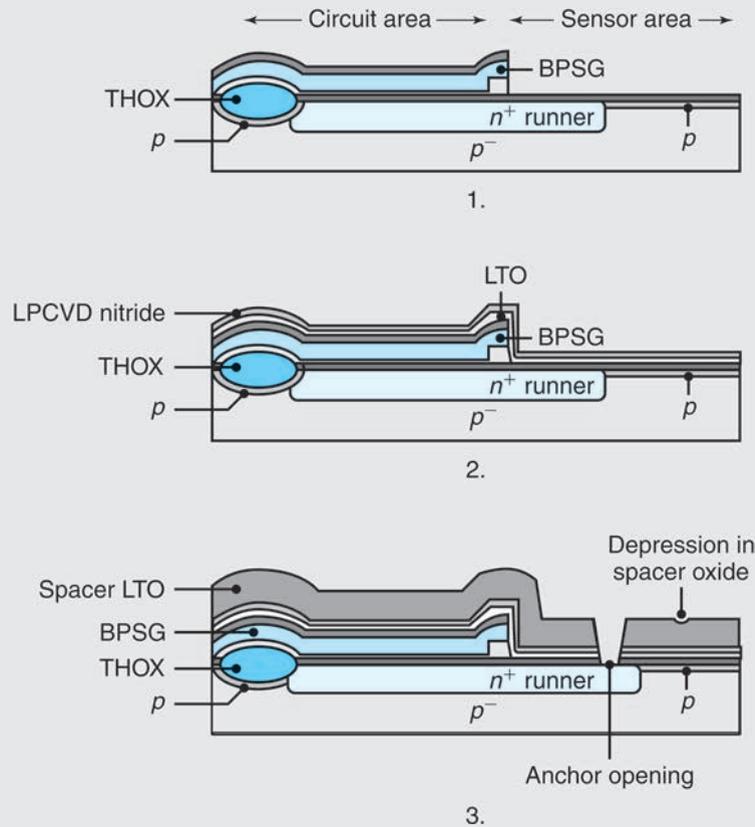


FIGURE 29.28 Preparation of IC chip for polysilicon. 1. Sensor area post-borophosphosilicate glass (BPSG) planarization and moat mask. 2. Blanket deposition of thin oxide and thin nitride layer. 3. Bumps and anchors made in low-temperature oxide (LTO) spacer layer. *Source:* From T.A. Core, et al., *Solid State Technol.*, v. 36, pp. 39–47, 1993. Printed by permission of PennWell Corporation.

polysilicon released etching (step 2 in Fig. 29.28). The spacer or sacrificial oxide used is a $1.6\text{-}\mu\text{m}$ ($64\text{-}\mu\text{in.}$) densified low-temperature oxide (LTO), deposited over the whole die (step 3 in Fig. 29.28).

In a first etching, small depressions (that will form bumps or dimples on the underside of the polysilicon sensor) are created in the LTO layer. These bumps will limit adhesive forces and sticking in the event that the sensor comes in contact with the substrate. A subsequent etching step cuts anchors into the spacer layer, to provide regions of electrical and mechanical contact (step 3 in Fig. 29.28). The $2\text{-}\mu\text{m}$ ($80\text{-}\mu\text{in.}$) thick sensor of polysilicon layer

is deposited, implanted, annealed, and patterned (step 1 in Fig. 29.29).

Metallization follows, starting with the removal of the sacrificial spacer oxide from the circuit area, along with the LPCVD nitride and LTO layer. A low-temperature oxide is deposited on the polysilicon-sensor part, and contact openings appear in the IC part of the die, where platinum is deposited to form platinum silicide (step 2 in Fig. 29.29). The trimmable thin-film material (TiW barrier metal) and Al–Cu interconnect metal are sputtered on and patterned in the IC area.

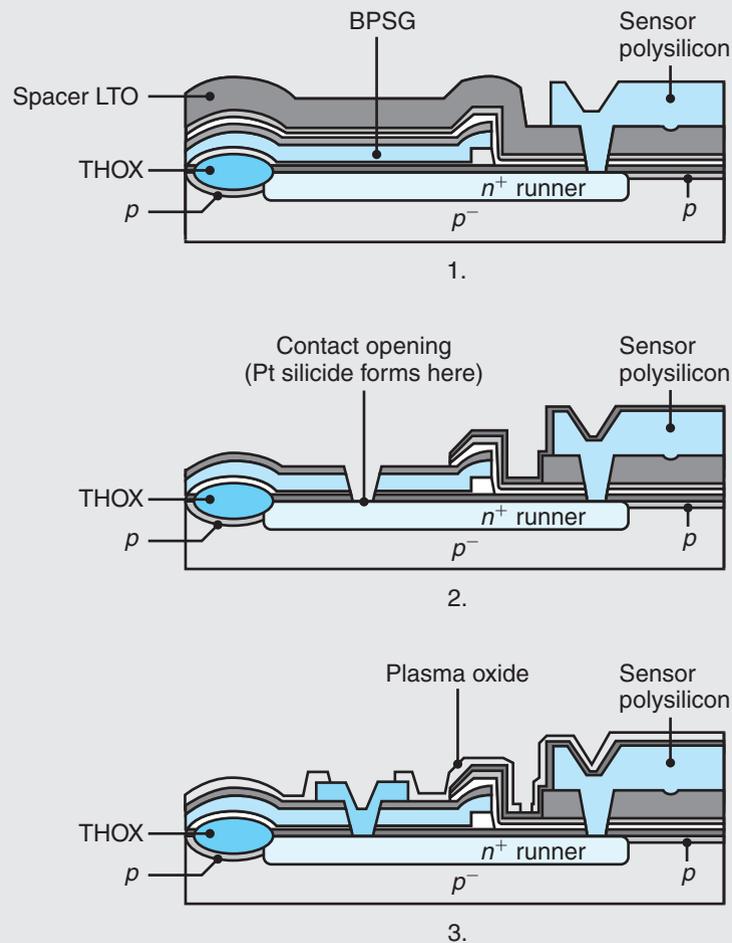


FIGURE 29.29 Polysilicon deposition and IC metallization. 1. Cross-sectional view after polysilicon deposition, implanting, annealing, and patterning. 2. Sensor area after removal of dielectrics from circuit area, contact mask, and platinum silicide. 3. Metallization scheme and plasma-oxide passivation and patterning. *Source:* From T.A. Core, et al., *Solid State Technol.*, v. 36, pp. 39–47, 1993. Printed by permission of PennWell Corporation.

The circuit area is then passivated in two separate deposition steps. First, plasma oxide is deposited and patterned (step 3 in Fig. 29.29), followed by a plasma nitride (step 1 in Fig. 29.30), to form a seal with the previously deposited LCVD nitride. The nitride acts as a hydrofluoric-acid barrier in the subsequent etch release in surface micromachining. The plasma oxide left on the sensor acts as an etch stop for the removal of the plasma nitride (step 1 in Fig. 29.30). The sensor area is then prepared for

the final release etch. The dielectrics are removed from the sensor, and the final protective resist mask is applied. The photoresist protects the circuit area from the long-term buffered oxide etch (step 2 in Fig. 29.30). The final device cross-section is shown in step 3 in Fig. 29.30.

Source: Adapted from M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, 2nd ed., CRC Press, 2002.

(continued)

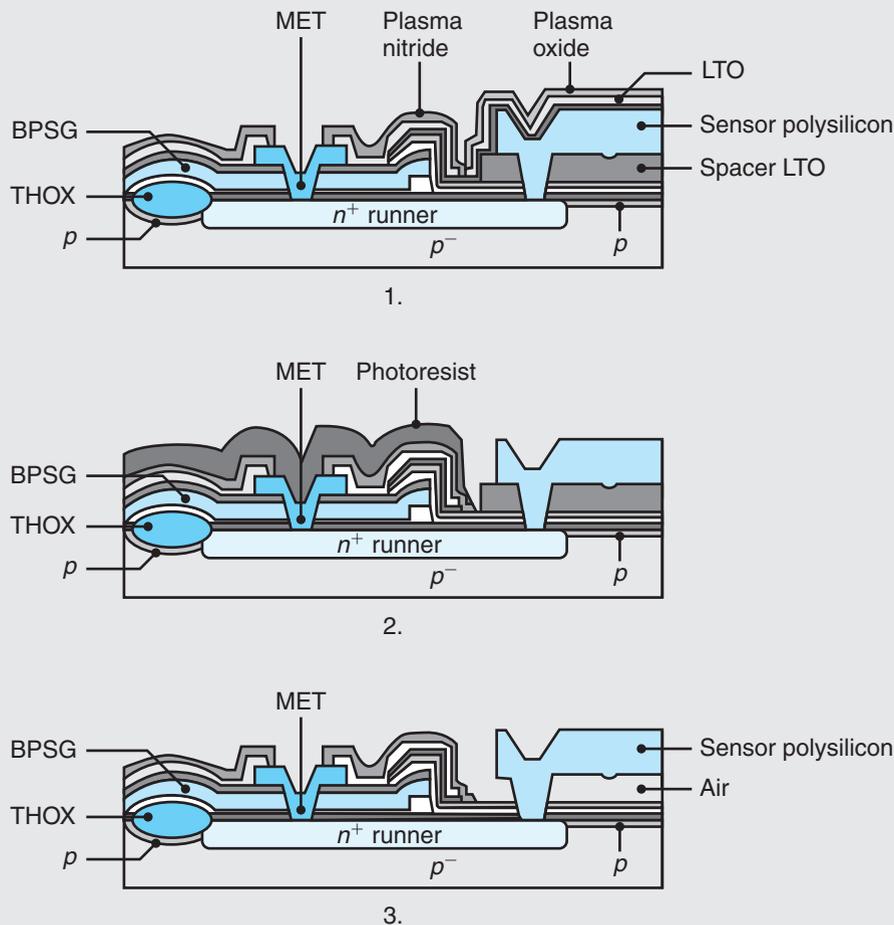


FIGURE 29.30 Prerelease preparation, and release. 1. Post-plasma nitride passivation and patterning. 2. Photoresist protection of the IC. 3. Freestanding, released polysilicon beam. *Source:* From T.A. Core, et al., *Solid State Technol.*, v. 36, pp. 39–47, 1993. Printed by permission of PennWell Corporation.

29.5 Nanoscale Manufacturing

In *nanomanufacturing*, parts are produced at nanometer length scales; the term usually refers to manufacturing below the micrometer scale, or between 10^{-9} and 10^{-6} m in length. Many of the features in integrated circuits are at this length scale, but very little else has significant relevance to manufacturing. Molecularly engineered medicines and other forms of biomanufacturing are the only commercial applications at present, except for some limited uses of carbon nanotubes (see Section 8.8). However, it has been recognized that many physical and biological processes act at this length scale; consequently, the approach holds much promise for future innovations.

Nanoscale manufacturing techniques are outlined in Table 29.3. Nanomanufacturing takes two basic approaches: top down and bottom up. **Top-down** approaches use *large building blocks* (such as a silicon wafer; see Fig. 28.2) and various manufacturing processes (such as lithography, and wet and plasma etching) to construct ever smaller features and products (microprocessors, sensors, and probes). At the other

TABLE 29.3

Comparison of Nanoscale Manufacturing Techniques						
Characteristic	Top down			Both top down and bottom up	Bottom up	
Nanopatterning technique	Photolithography	Electron beam lithography	Nanoimprint lithography	Dip pen nanolithography	Microcontact printing	Scanning tunneling microscopy
Material flexibility	No	No	No	Yes	Yes	Limited
Resolution	~35 nm	~15 nm	~10 nm	14 nm	~100 nm	Atomic
Registration accuracy	High	High	High	Extremely high	Low	Extremely high
Speed	Very fast	Moderate	Fast	Slower, but scalable	Fast	Very slow
Cycle time	Weeks	Days	Days–week	Hours	Days–weeks	Days
Cost						
Purchase	>\$10 M	>\$1 M	>\$500K	<\$250 K	~\$200 K	>\$250 K
Operation	High	High	Moderate	Low	Moderate	Low

Source: Courtesy of NanoInk, Inc. Reprinted by permission.

extreme, **bottom-up** approaches use *small building blocks* (such as atoms, molecules, or clusters of atoms and molecules) to build up a structure. In theory, bottom-up approaches are similar to the additive manufacturing technologies described in Section 20.3. When placed in the context of nanomanufacturing, however, bottom-up approaches suggest the manipulation and construction of products are on an atomic or molecular scale.

Bottom-up approaches are widely used in nature (e.g., building cells is a fundamentally bottom-up approach), whereas conventional manufacturing has, for the most part, consisted of top-down approaches. In fact, there are presently no nanomanufactured products (excluding medicines and drugs “manufactured” by bacteria) that have demonstrated commercial viability.

Bottom-up approaches in various research applications can use atomic-force microscopy (AFM) for the manipulation of materials on the nanoscale. Figure 29.29 is an illustration of an atomic-force microscope. A probe (Fig. 29.31b) is mounted into the microscope, and a laser is reflected from a mirror on the back side of the probe so that it reflects onto a set of photosensors. Any vertical or torsional deflection of the cantilever is registered as a change in voltage on the photosensors. Atomic-force microscopes can have true atomic resolution of $<1 \times 10^{-10}$ m.

Atomic-force microscopes are widely used to measure the surface profile of very smooth surfaces (Section 33.3). Several approaches have been developed to allow nanoscale manufacturing processes to be performed on these microscopes. Some top-down approaches are:

- **Photolithography, electron-beam lithography, and nanoimprint (soft) lithography.** These techniques are capable of top-down manufacture of structures, with resolution under 100 nm, as discussed in Section 28.7.
- **Nanolithography.** The probes used in atomic-force microscopy vary greatly in size, materials, and capabilities. The diamond-tipped stainless-steel cantilever shown in Fig. 29.31b has a tip radius of around 10 nm. By contacting and plowing across a surface, it can produce grooves up to a few μm thick. The spacing between lines depends on the groove depth needed.

- Dip pen nanolithography.** This approach (Fig. 29.32) is used in an atomic-force microscope to transfer chemicals onto substrates. The process can produce lines as narrow as 10 nm. Dip pen nanolithography can be used with many parallel pens (Fig. 29.32b), typically made of silicon nitride and containing as many as 55,000 pens in a 1-cm² area. In a top-down approach, dip pen nanolithography is used to produce a mask suitable for lithography.

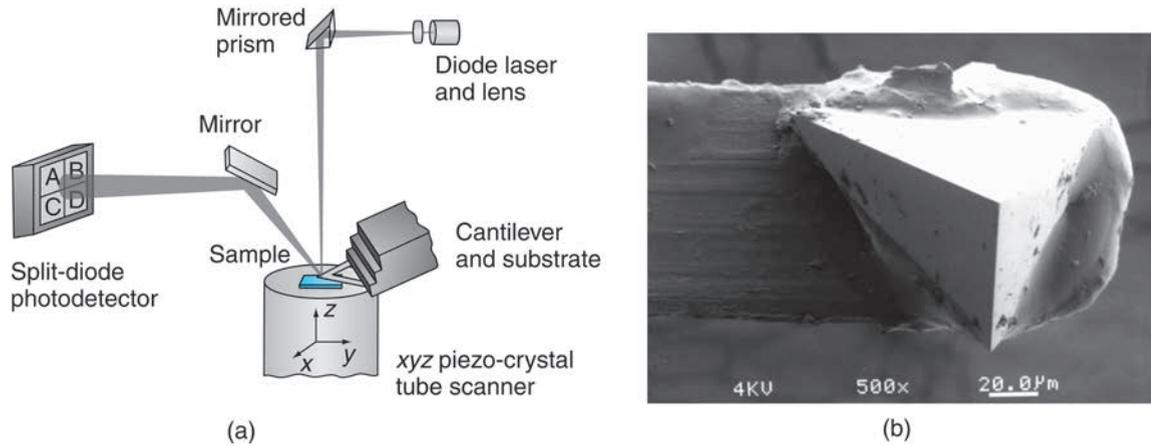


FIGURE 29.31 (a) Schematic illustration of an atomic-force microscope. A probe is mounted on a cylinder containing piezoelectric material; this arrangement allows translation of the probe in three dimensions. A laser, reflected from a mirror on the back of the probe onto a set of photosensors, allows measurement of the probe's location and monitoring of interactions with a sample surface. (b) Scanning-electron microscope image of a diamond-tipped stainless-steel cantilever suitable for nanolithography.

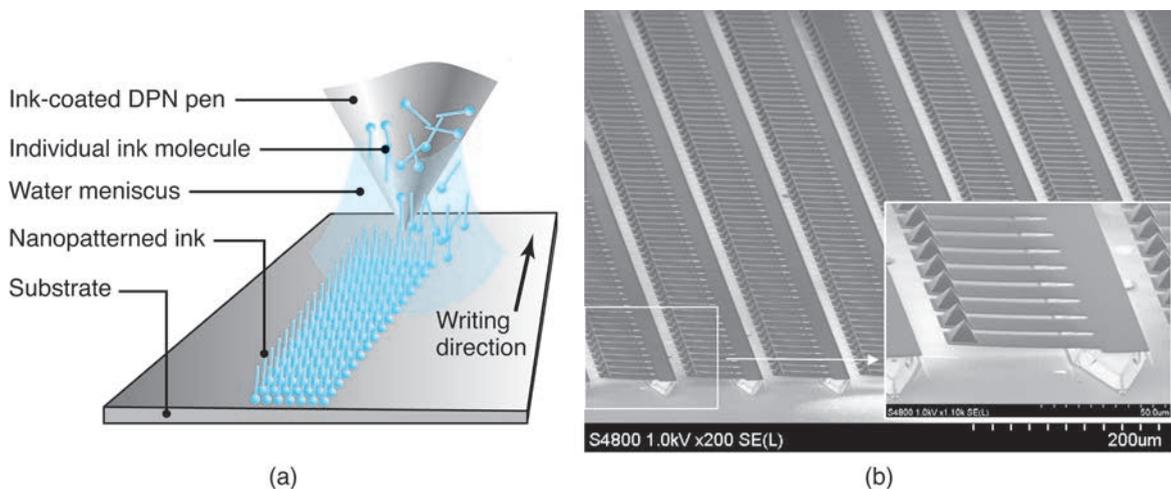


FIGURE 29.32 (a) Schematic illustration of dip pen nanolithography. (b) An array of pens used to produce identical patterns on surfaces. Commercial pen arrays can contain up to 55,000 pens; only a fraction of the available pens are shown. The inset highlights individual cantilevers, showing the 7.5- μm -high tips. *Source:* Courtesy of NanoInk, Inc.

Bottom-up approaches include:

- Dip pen nanolithography also can be a bottom-up approach, wherein the ink contains the material used to build the structure.
- *Microcontact printing* uses soft-lithography approaches, to deposit material on surfaces from which nanoscale structures can be produced.
- *Scanning tunneling microscopy* can be used to manipulate an atom on an atomically smooth surface (usually cleaved mica or quartz).

SUMMARY

- MEMS is relatively new and developing rapidly. Although most successful commercial MEMS applications are in the optics, printing, and sensor industries, the possibilities for new device concepts and circuit designs appear to be endless.
- MEMS devices are manufactured through techniques and with materials that, for the most part, have been pioneered in the microelectronics industry. Bulk and surface micromachining are processes that are well developed for single-crystal silicon.
- Specialized processes for MEMS include variations of machining, such as DRIE, SIMPLE, and SCREAM. These processes produce freestanding mechanical structures in silicon.
- Polymer MEMS can be manufactured through LIGA or microstereolithography. LIGA combines X-ray lithography and electroforming to produce three-dimensional structures. Related processes include multilayer X-ray lithography and HEXSIL.
- Nanoscale manufacturing is a relatively new area that has significant potential. The processes are typically bottom up, whereas conventional manufacturing is top down. Some lithography processes extend to the nanoscale, as does dip pen lithography. Materials such as carbon nanotubes have great potential for nanoscale devices.

KEY TERMS

Atomic-force microscope	HEXSIL	Multilayer X-ray	SIMPLE
Bulk micromachining	LIGA	lithography	Stiction
Diffusion bonding	MEMS	Planarization	Surface
Dip pen nanolithography	Micromachining	Sacrificial layer	micromachining
EFAB	Microstereolithography	SCREAM	UV-LIGA
Electrochemical fabrication	MolTun	Silicon-LIGA	

BIBLIOGRAPHY

- Adams, T.M., and Layton, R.W., **Introductory MEMS: Fabrication and Applications**, Springer, 2009.
- Allen, J.J., **Microelectromechanical System Design**, CRC Press, 2006.
- Elwenspoek, M., and Jansen, H., **Silicon Micromachining**, 2nd ed., Cambridge University Press, 2004.
- Elwenspoek, M., and Wiegerink, R., **Mechanical Microsensors**, Springer, 2001.
- Fraden, J., **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications**, 4th ed., Springer, 2010.
- Gad-el-Hak, M. (ed.), **The MEMS Handbook**, 2nd ed. (3 vols.), CRC Press, 2006.
- Ghodssi, R., and Lin, P. (eds.), **MEMS Materials and Processes Handbook**, Springer, 2011.
- Harper, C.A. (ed.), **Electronic Packaging and Interconnection Handbook**, 4th ed., McGraw-Hill, 2004.

- Hsu, T.-R., *MEMS & Microsystems: Design, Manufacture, and Nanoscale Engineering*, 2nd ed., Wiley, 2008.
- Jha, A.R., *MEMS and Nanotechnology-based Sensors and Devices for Communications, Medical and Aerospace Applications*, CRC Press, 2008.
- Kempe, V., *Inertial MEMS: Principles and Practice*, Cambridge, 2011.
- Korvink, J., and Oliver, P. (eds.), *MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications*, William Andrew, 2005.
- Leondes, C.T., *MEMS/NEMS Handbook* (5 vols.), Springer, 2007.
- Liu, C., *Foundations of MEMS*, 2nd ed., Prentice Hall, 2011.
- Madou, M.J., *Manufacturing Techniques for Microfabrication and Nanotechnology*, CRC Press, 2009.
- Madou, M.J., *Applications of Microfabrication and Nanotechnology*, CRC Press, 2009.
- Maluf, N., *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, 2nd ed., Artech House, 2004.
- Nishi, Y., and Doering, R. (eds.), *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technologies*, 2nd ed., CRC Press, 2007.
- Rockett, A., *The Materials Science of Semiconductors*, Springer, 2008.
- Schaeffer, R., *Fundamentals of Laser Micromachining*, Taylor & Francis, 2012.
- Sze, S.M., *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 3rd ed., Wiley, 2012.
- Varadan, V.K., Jiang, X., and Varadan, V., *Microstereolithography and Other Fabrication Techniques for 3D MEMS*, Wiley, 2001.

REVIEW QUESTIONS

- 29.1** Define MEMS, SIMPLE, SCREAM, and HEXSIL.
- 29.2** Give three examples of common microelectromechanical systems.
- 29.3** Why is silicon often used with MEMS devices?
- 29.4** Describe bulk and surface micromachining.
- 29.5** What is the purpose of a spacer layer in surface micromachining?
- 29.6** What is the main limitation to successful application of MEMS?
- 29.7** What are common applications for MEMS and MEMS devices?
- 29.8** What is LIGA? What are its advantages?
- 29.9** What is a sacrificial layer?
- 29.10** Explain the differences between stereolithography and microstereolithography.
- 29.11** What is MolTun? What are its main advantages?
- 29.12** What is HEXSIL?
- 29.13** What do SIMPLE and SCREAM stand for?

QUALITATIVE PROBLEMS

- 29.14** Describe the difference between isotropic etching and anisotropic etching.
- 29.15** Lithography produces projected shapes, so true three-dimensional shapes are more difficult to produce. What lithography processes are best able to produce three-dimensional shapes, such as lenses? Explain.
- 29.16** Which process or processes in this chapter allow the fabrication of products from polymers?
- 29.17** What is the difference between chemically reactive ion etching and dry-plasma etching?
- 29.18** The MEMS devices discussed in this chapter are applicable to macroscale machine elements, such as spur gears, hinges, and beams. Which of the following machine elements can or cannot be applied to MEMS, and why? (a) Ball bearings, (b) bevel gears, (c) worm gears, (d) cams, (e) helical springs, (f) rivets, and (g) bolts.
- 29.19** Explain how you would produce a spur gear if its thickness was one-tenth of its diameter and its diameter was (a) 1 mm, (b) 10 mm, and (c) 100 mm.
- 29.20** List the advantages and disadvantages of surface micromachining compared with bulk micromachining.
- 29.21** What are the main limitations to the LIGA process? Explain.
- 29.22** Other than HEXSIL, what process can be used to make the microtweezers shown in Fig. 29.23? Explain.
- 29.23** Is there an advantage to using the MolTun process for other materials? Explain.

QUANTITATIVE PROBLEMS

- 29.24** The atomic-force microscope probe shown in Fig. 29.31 has a stainless steel cantilever that is $450\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$. Using equations from solid mechanics, estimate the stiffness of the cantilever, and the force required to deflect the end of the cantilever by $1\ \mu\text{m}$.

29.25 Estimate the natural frequency of the cantilever in Problem 29.24. *Hint:* See Problem 3.21.

29.26 Tapping-mode probes for the atomic-force microscope are produced from etched silicon and have typical dimensions of $125\ \mu\text{m}$ in length, $30\ \mu\text{m}$ in width, and $3\ \mu\text{m}$ in thickness. Estimate the stiffness and natural frequency of such probes.

29.27 Using data from Chapter 28, derive the time needed to etch the hinge shown in Fig. 29.7 as a function of the hinge thickness.

29.28 It is desired to produce a $500\ \mu\text{m}$ by $500\ \mu\text{m}$ diaphragm, $25\ \mu\text{m}$ thick, in a silicon wafer $250\ \mu\text{m}$ thick.

Given that you will use a wet etching technique, with KOH in water with an etch rate of $1\ \mu\text{m}/\text{min}$, calculate the etching time and the dimensions of the mask opening that you would use on a (100) silicon wafer.

29.29 If the Reynolds number for water flow through a pipe is 2000, calculate the water velocity if the pipe diameter is (a) $10\ \text{mm}$; (b) $100\ \mu\text{m}$. Do you expect flow in MEMS devices to be turbulent or laminar? Explain.

SYNTHESIS, DESIGN, AND PROJECTS

29.30 List similarities and differences between IC technologies described in Chapter 28 and miniaturization technologies presented in this chapter.

29.31 Figure I.7b in the General Introduction shows a mirror that is suspended on a torsional beam, and can be inclined through electrostatic attraction by applying a voltage on either side of the micromirror at the bottom of the trench. Make a flowchart of the manufacturing operations required to produce this device.

29.32 Referring to Fig. 29.5, design an experiment to find the critical dimensions of an overhanging cantilever that will not stick to the substrate.

29.33 Design an accelerometer by using (a) the SCREAM process and (b) the HEXSIL process.

29.34 Design a micromachine or device that allows the direct measurement of the mechanical properties of a thin film.

29.35 Conduct a literature search and determine the smallest diameter hole that can be produced by (a) drilling, (b) punching, (c) water-jet cutting, (d) laser machining, (e) chemical etching, and (f) EDM.

29.36 Perform a literature search and write a one-page summary of applications in biomes.

PARTE VI

Procesos y equipos para unir

Algunos productos como clips, clavos, balines de acero para rodamientos, tornillos y pernos, están hechos de un solo componente. Sin embargo, casi todos los productos son ensambles de componentes manufacturados como partes individuales. Incluso productos relativamente sencillos constan de al menos dos componentes distintos unidos por varios medios. Por ejemplo: (a) el borrador de un lápiz común está unido con una funda de latón; (b) algunos cuchillos de cocina tienen mangos de madera o plástico unidos a la hoja de metal con remaches y (c) las ollas y cacerolas de cocina tienen manijas de metal, plástico o madera y perillas que se han sujetado al recipiente siguiendo varios métodos.

En una escala mucho mayor, observe las herramientas eléctricas, lavadoras, motocicletas, barcos y aviones, y la forma en que están ensamblados y unidos sus numerosos componentes, de manera que no sólo funcionan de manera confiable sino también son rentables de producir. Como se aprecia en la tabla I.1 de la introducción general, una podadora giratoria tiene alrededor de 300 partes, un automóvil normal consta de 15 000 componentes (figura VI.1), en tanto que un avión Boeing 747-400 tiene más de seis millones de partes. En contraste, un Dreamliner Boeing 787 tiene menos partes debido a que su fuselaje compuesto elimina una gran cantidad de sujetadores.

La palabra **unión** es un término que incluye todos los procesos como soldar, soldadura fuerte, soldadura blanda, pegado con adhesivos y sujeción con mecanismos. Estos

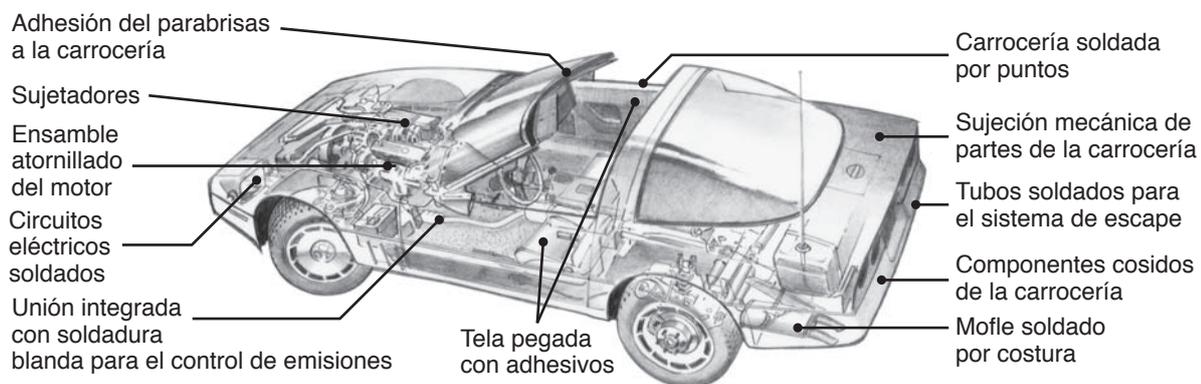
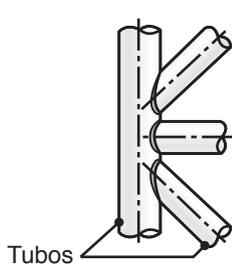


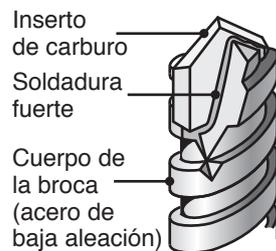
FIGURA VI.1 Diferentes partes en un automóvil común que se ensamblan mediante los procesos descritos en la parte VI.

procesos son un aspecto esencial e importante de la manufactura y las operaciones de ensamblado, por una o más de las razones siguientes:

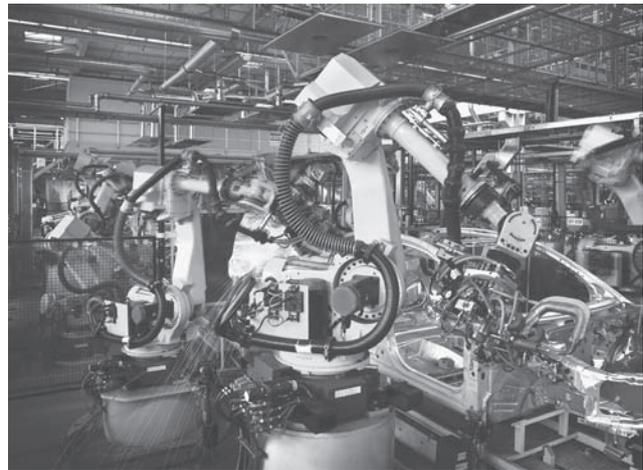
- Incluso un producto relativamente simple puede ser imposible de manufacturar como *una sola pieza*. Por ejemplo, considere la construcción tubular que se ilustra en la figura VI.2a. Suponga que cada uno de los brazos de dicho producto mide 5 m (15 pies) de largo; los tubos tienen 100 mm (4 pulg) de diámetro y el espesor de su pared es de 1 mm (0.04 pulg). Después de revisar todos los procesos de manufactura descritos en los capítulos precedentes, alguien concluiría que manufacturar este producto en una sola pieza sería imposible o no viable económicamente.
- Un producto como una cacerola con un asa es *más fácil y más económico* de fabricar a partir de componentes individuales, los cuales se ensamblan después.
- Productos como aparatos domésticos, secadoras de pelo y motores de automóviles deben diseñarse de modo que se puedan *desarmar* para darles mantenimiento o sustituir sus partes desgastadas o descompuestas.
- Para propósitos de funcionamiento del producto sería deseable que tuvieran *propiedades diferentes*. Por ejemplo, las superficies sujetas a fricción, desgaste, corrosión o ataque ambiental, por lo general requieren características que difieren de manera significativa con respecto al conjunto de componentes. Algunos ejemplos son (a) brocas para mampostería con puntas cortadoras de carburo unidas con soldadura fuerte al cuerpo de la herramienta (figura VI.2b); (b) balatas de frenos automotrices y (c) esmeriles adheridos a un soporte de metal (sección 26.2).
- El *transporte* del producto en sus componentes individuales para ensamblarlos posteriormente puede ser más fácil y menos costoso que transportar el producto terminado. Por ejemplo, los anaqueles metálicos o de madera, parrillas y máquinas grandes, se ensamblan después de que los componentes o subensambles se han transportado al sitio apropiado.



(a)



(b)



(c)

FIGURA VI.2 Ejemplos de partes que utilizan procesos de unión. (a) Parte tubular fabricada mediante la unión de sus componentes individuales; este producto no puede manufacturarse en una sola pieza por ninguno de los métodos descritos en los capítulos anteriores si consta de brazos largos de paredes delgadas, diámetro grande y forma tubular. (b) Fragmento de broca con punta de inserto de carburo unida por soldadura fuerte al cuerpo de acero; éste es un ejemplo de una parte en la que por razones de rendimiento se necesita que se usen dos materiales. (c) Soldadura de carrocerías automotrices por puntos.

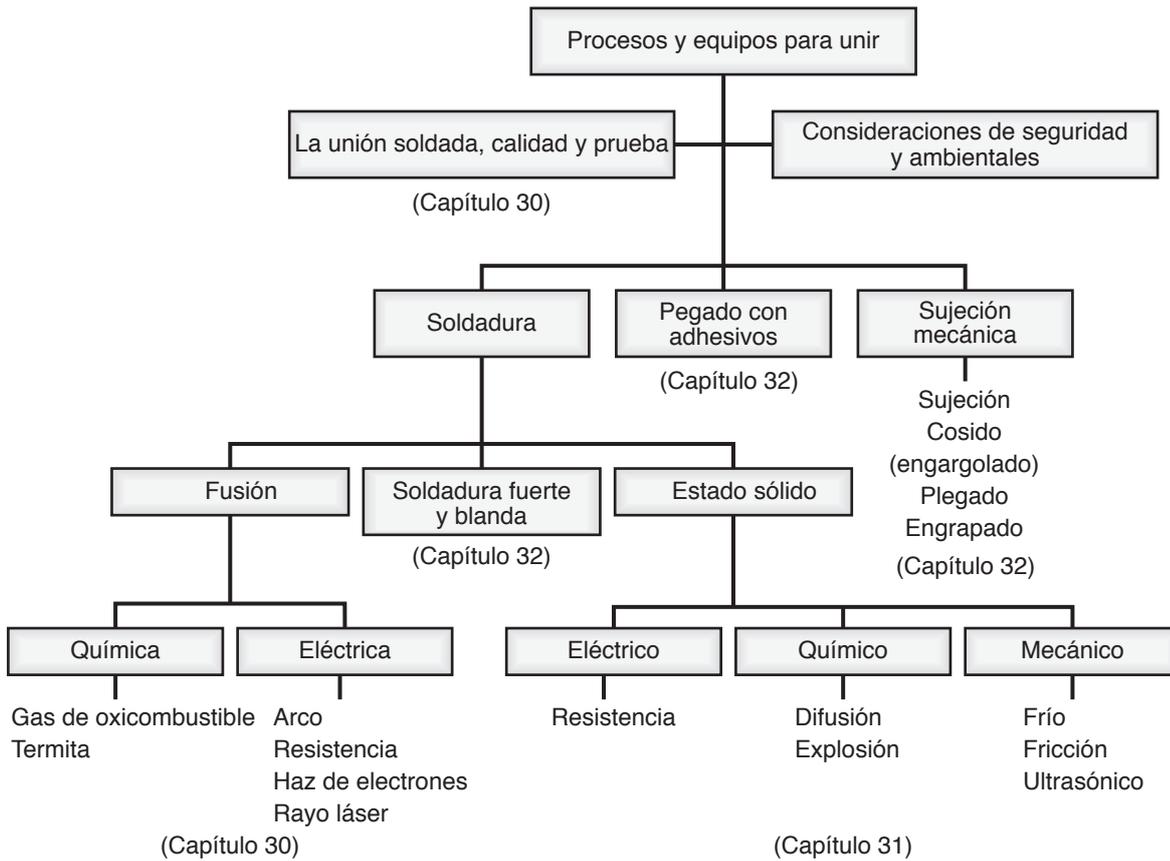


FIGURA VI.3 Panorama de los temas descritos en la parte VI.

Aunque hay diferentes maneras de clasificar la amplia variedad de procesos de unión existentes, de acuerdo con la American Welding Society (AWS), se encuentran en las siguientes tres grandes categorías (figuras VI.3 y I.7f):

- **Soldadura.**
- **Unión adhesiva.**
- **Sujeción mecánica.**

La tabla VI.1 enuncia las características relativas de los distintos procesos de unión. A su vez, los procesos de soldadura por lo general se clasifican en tres categorías básicas: soldadura por fusión, soldadura de estado sólido, soldadura fuerte y soldadura blanda.

Como se verá, algunos tipos de los procesos de soldadura se pueden clasificar tanto en la categoría de fusión como en la de estado sólido.

La **soldadura por fusión** se define como el derretimiento y coalescencia de materiales que se encuentran adyacentes, por medio de calor usualmente suministrado por medios químicos o eléctricos. En la soldadura por fusión pueden usarse o no metales de aporte. Esta operación se compone de los procesos de *soldadura de arco con electrodos consumibles* y *no consumibles* y *soldadura de haz de alta energía*. La unión soldada sufre cambios metalúrgicos y físicos importantes, que a su vez tienen gran influencia en las propiedades y rendimiento del componente o estructura soldada. En la figura VI.4 se presenta la terminología de ciertas uniones sencillas soldadas.

TABLA VI.1

Método	Características								
	Resistencia	Diseño	Partes pequeñas	Partes grandes	Tolerancias	Confiabilidad	Facilidad de manufactura	Facilidad de inspección	Costo
Soldadura de arco	1	2	3	1	3	1	2	2	2
Soldadura con resistencia	1	2	1	1	3	3	3	3	1
Soldadura con latón	1	1	1	1	3	1	3	2	3
Tornillos y tuercas	1	2	3	1	2	1	1	1	3
Remaches	1	2	3	1	1	1	3	1	2
Cosido (engargolado) y plegado	2	2	1	3	3	1	3	1	1
Unión adhesiva	3	1	1	2	3	2	3	3	2

Nota: 1 = Muy buena; 2 = Buena; 3 = Mala. Por costo, 1 = El más bajo.

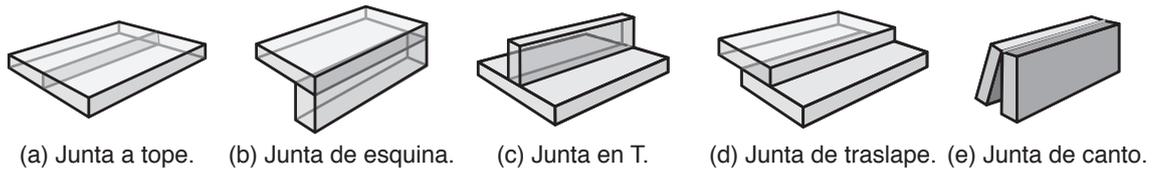


FIGURA VI.4 Ejemplos de uniones que pueden hacerse con varios de los procesos de unión descritos en los capítulos 30 a 32.

En la **soldadura de estado sólido** las uniones tienen lugar sin fusión; en consecuencia no hay una fase líquida (fundida) en la unión. Los procesos básicos en esta categoría son *soldadura por difusión y fría, ultrasónica, por fricción, por resistencia y por explosión*. La **soldadura fuerte** (o **latonado**) utiliza metales de aporte e implica temperaturas más bajas que en la soldadura normal. La **soldadura blanda** (o **estañado**) utiliza metales de aporte similares (*soldadura de bajo punto de fusión*) e implica temperaturas aún más bajas.

La **unión adhesiva** tiene aplicaciones únicas que requieren resistencia, costuras, aislamiento térmico y eléctrico, soportar vibraciones y resistencia a la corrosión entre metales disímiles. La **sujeción mecánica** implica los métodos tradicionales del uso de diferentes sujetadores: pernos, tuercas y remaches. La **unión de plásticos** se lleva a cabo con unión adhesiva, fusión por varias fuentes externas o internas de calor y sujeción mecánica.

Procesos de soldadura por fusión

CAPÍTULO 30

- En este capítulo se describen los procesos de soldadura por fusión, en la cual se unen dos piezas por medio de la aplicación de calor, lo que derrite y funde la interfase; en ocasiones la operación es asistida por un metal de aporte.
- En este capítulo se describen todos los procesos de soldadura por fusión; se comienza con la soldadura con gas oxcombustible en la cual el acetileno y el oxígeno proporcionan la energía requerida para soldar.
- Luego se describen varios procesos de soldadura por arco, en los que se usan energía eléctrica y electrodos consumibles y no consumibles para producir la soldadura; entre los procesos específicos examinados están soldadura por arco metálico protegido, soldadura por arco de núcleo fundente, soldadura por arco de gas tungsteno, soldadura por arco sumergido y soldadura por arco de gas metálico.
- Se analiza la soldadura con haces de alta energía, en la cual los haces de electrones o el rayo láser proporcionan fuentes de calor muy concentradas.
- El capítulo concluye con el estudio de la naturaleza de la unión soldada y se incluye la calidad e inspección de la soldadura, así como los procedimientos de prueba; también se estudian las prácticas de diseño de la soldadura y la selección del proceso.

- 30.1 Introducción 877
- 30.2 Soldadura con gas oxcombustible 877
- 30.3 Procesos de soldadura por arco: electrodo no consumible 882
- 30.4 Procesos de soldadura por arco: electrodo consumible 885
- 30.5 Electrodos para soldadura por arco 890
- 30.6 Soldadura con haz de electrones 892
- 30.7 Soldadura con rayo láser 893
- 30.8 Corte 894
- 30.9 Unión soldada, calidad y prueba de la soldadura 896
- 30.10 Diseño de la unión y selección del proceso 905

30.1 Introducción

Los procesos de soldadura descritos en este capítulo implican el derretimiento parcial y la fusión entre dos miembros que se han de unir. Aquí se define la **soldadura por fusión** como el hacer que los materiales se *derritan juntos y entren en coalescencia* por medio de calor. También se utilizan *metales de aporte*, los cuales se agregan al área de soldadura durante el proceso. Las soldaduras que se hacen sin el uso de metales de aporte se conocen como *soldaduras autógenas*.

Este capítulo cubre los principios básicos de cada proceso de soldadura; el equipo utilizado; las ventajas relativas, limitaciones y capacidades del proceso, así como las consideraciones económicas que afectan la selección del proceso (tabla 30.1). El capítulo continúa con la descripción de las características de la zona de soldadura y la variedad de discontinuidades y defectos que pueden ocurrir en las uniones soldadas. Después se revisa la soldabilidad de los distintos metales ferrosos y no ferrosos, así como de las aleaciones. El capítulo concluye con un estudio de los lineamientos de diseño para soldar, con varios ejemplos de buenas prácticas de diseño de la soldadura y con la economía de la soldadura.

30.2 Soldadura con gas oxcombustible

La frase *soldadura con gas oxcombustible* (OFW, por sus siglas en inglés) es un término general para describir cualquier proceso de soldadura que use un **gas combustible** con **oxígeno** para producir una flama, que es la fuente de calor requerida para derretir metales

EJEMPLOS:

- 30.1 Velocidad de la soldadura para diferentes materiales 883
- 30.2 Soldadura con rayo láser de navajas de afeitar 894
- 30.3 Selección del diseño de la soldadura 908

TABLA 30.1

Características generales de los procesos de soldadura por fusión

Proceso de unión	Operación	Ventaja	Nivel de habilidad requerido	Posición de la soldadura	Tipo de corriente	Distorsión*	Costo normal del equipo (\$)
Arco de electrodo revestido	Manual	Portátil y flexible	Alto	Todas	CA, CD	1-2	Bajo (1500+)
Arco sumergido	Automática	Gran deposición	Bajo a medio	Plana y horizontal	CA, CD	1-2	Medio (5000+)
Arco de gas metálico	Semiautomática o automática	La mayoría de metales	Bajo a alto	Todas	CD	2-3	Medio (5000+)
Arco de gas tungsteno	Manual o automática	La mayoría de metales	Bajo a alto	Todas	CA, CD	2-3	Medio (2000+)
Arco de núcleo fundente	Semiautomática o automática	Gran deposición	Bajo a alto	Todas	CD	1-3	Medio (2000+)
Oxicombustible	Manual	Portátil y flexible	Alto	Todas	—	2-4	Bajo (500+)
Haz de electrones, rayo láser	Semiautomática o automática	La mayoría de metales	Medio a alto	Todas	—	3-5	Alto (de 100 000 a 1 millón)
Termita	Manual	Aceros	Bajo	Plana y horizontal	—	2-4	Bajo (500+)

*1 = La más alta; 5 = La más baja.

en la unión. El gas más común que se emplea en el proceso de soldadura es el acetileno; el proceso se conoce como *soldadura con gas oxiacetileno* (OAW, por sus siglas en inglés) y su uso es típico en la fabricación de estructuras metálicas y trabajos de reparación.

Desarrollada a principios de la década de 1900, la soldadura de oxiacetileno utiliza el calor generado por la combustión de gas acetileno (C_2H_2) mezclado con oxígeno. El calor es generado en concordancia con un par de reacciones químicas. El proceso de combustión primaria, el cual ocurre en el núcleo interno de la flama (figura 30.1), implica la reacción siguiente:



Esta reacción disocia el acetileno en monóxido de carbono e hidrógeno y produce alrededor de un tercio del calor total generado en la flama. El proceso de combustión secundaria es:



Esta reacción consiste en la combustión adicional tanto del hidrógeno como del monóxido de carbono y produce alrededor de dos tercios del calor total. Las temperaturas desarrolladas en la flama alcanzan los 3300 °C (6000 °F). Observe en la ecuación (30.2), que la reacción también produce vapor de agua.

Tipos de flamas. La proporción de acetileno y oxígeno en la mezcla de gas es un factor importante en la soldadura con gas oxicombustible. A una razón de 1:1 (es decir, cuando no hay oxígeno excedente), se considera que la flama es *neutra* (figura 30.1a). Con un suministro mayor de oxígeno, la flama puede ser dañina (en especial para los aceros), ya que oxida el metal; por esta razón, una flama con exceso de oxígeno se conoce como **flama oxidante** (figura 30.1b). Una flama oxidante sólo es deseable en la soldadura de cobre y en aleaciones basadas en cobre, porque en esas situaciones se forma sobre el metal fundido una delgada capa protectora de escoria (compuestos de óxidos). Si el oxígeno es insuficiente para que haya una combustión completa, la flama se conoce como **reductora**

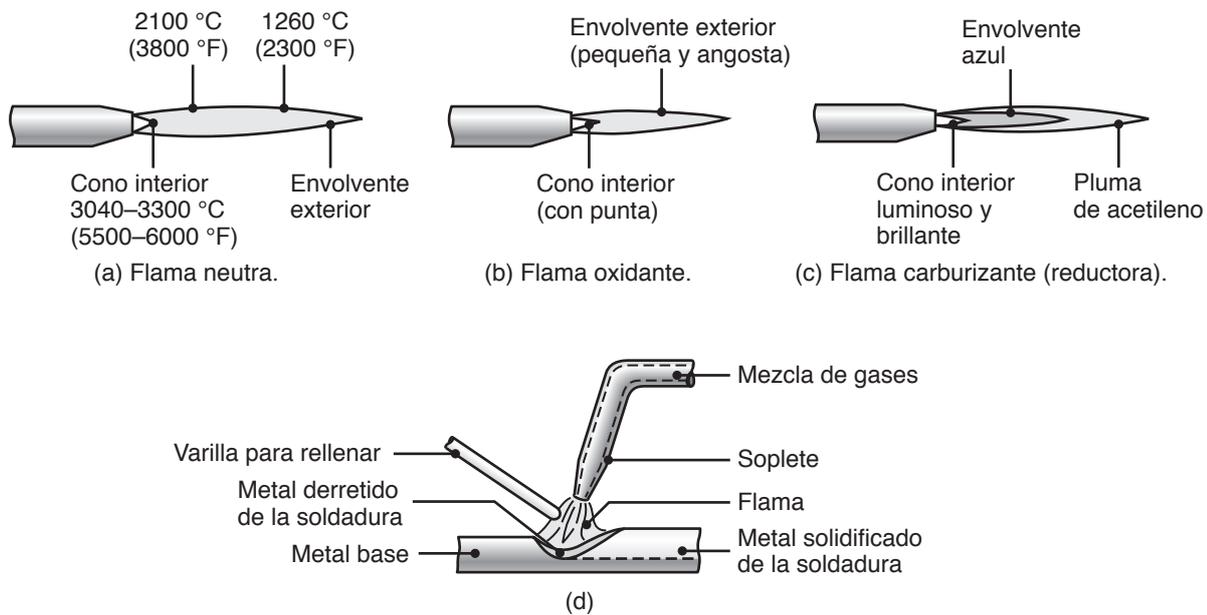


FIGURA 30.1 Tres tipos básicos de flamas de oxiacetileno que se usan en la soldadura con gas oxicomcombustible y en operaciones de corte: (a) flama neutra; (b) flama oxidante y (c) flama carburizante o reductora. La mezcla de gas en (a) tiene básicamente volúmenes iguales de oxígeno y acetileno. (d) Principio del proceso de la soldadura con gas oxicomcombustible.

o **carburizante** (figura 30.1c). La temperatura de una flama reductora es baja, por lo que es apropiada para aplicaciones que requieran poco calor, como en la soldadura con latón y en uniones (capítulo 32) y operaciones de endurecimiento con flama (tabla 4.1).

En la soldadura con gas oxicomcombustible también pueden usarse otros gases combustibles, como el hidrógeno y el metilacetileno propadieno. Sin embargo, las temperaturas desarrolladas por estos gases son menores que las producidas por el acetileno, por lo que se utilizan para soldar metales con puntos de fusión bajos, como el plomo, y partes delgadas y pequeñas.

Metales de aporte. Los *metales de aporte* se usan para suministrar metal adicional a la zona que se suelda; están disponibles en forma de **varillas** o **alambre** (figura 30.1d) y pueden estar desnudos o recubiertos con **fundente**. El propósito del fundente es retardar la oxidación de las superficies de las partes que se sueldan, al generar un escudo gaseoso en torno a la zona de soldadura. El fundente también ayuda a disolver y remover óxidos y otras sustancias de la zona de soldadura, lo que hace que la unión sea más fuerte. La *escoria* desarrollada (compuestos de óxidos, fundentes y materiales que recubren el electrodo) protege el charco de metal derretido contra la oxidación mientras se enfría.

La práctica y el equipo de soldadura. La soldadura con gas oxicomcombustible puede usarse con la mayor parte de metales ferrosos y no ferrosos para casi cualquier espesor de la pieza de trabajo, pero la generación de calor relativamente baja limita el proceso a espesores menores de 6 mm (0.25 pulg). Las pequeñas uniones hechas con este proceso pueden consistir en un solo cordón de soldadura; las uniones profundas de muescas en forma de V se hacen con pasadas múltiples. Para dar resistencia a la unión y evitar defectos (vea la sección 30.9), es importante limpiar la superficie de cada cordón de soldadura antes de depositar una segunda capa. Para este propósito se emplean cepillos de alambre (manuales o eléctricos).

El equipo para la soldadura con gas oxicomcombustible consiste básicamente en un **soplete** conectado con mangueras a cilindros de gas a alta presión y equipados con medidores de presión y reguladores (figura 30.2). Es esencial el empleo de equipo de seguridad,

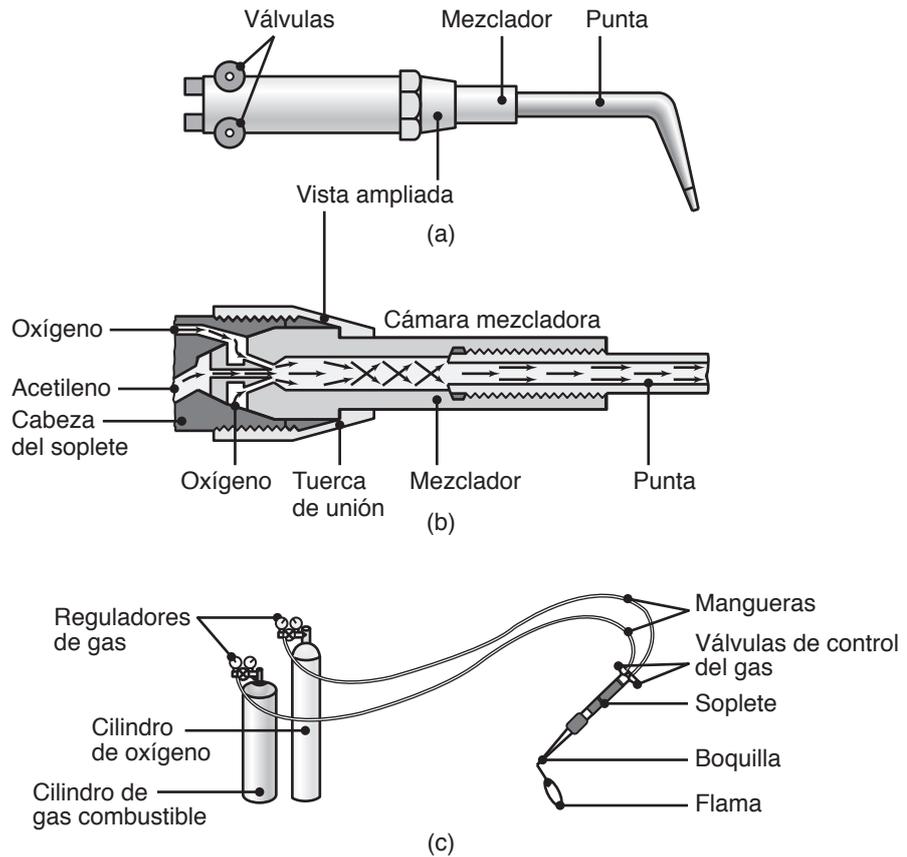


FIGURA 30.2 (a) Vista general de un soplete de uso en la soldadura con oxiacetileno y (b) su sección transversal. Primero se abre la válvula del acetileno; el gas se enciende con un encendedor de chispa o un piloto. Después se abre la válvula del oxígeno y se ajusta la flama. (c) Equipo básico que se usa en la soldadura con gas oxicomcombustible. Para garantizar las conexiones correctas, todas las roscas de las conexiones al acetileno son izquierdas, en tanto que las del oxígeno son derechas. Por lo general, los reguladores del oxígeno están pintados de verde y los del acetileno en rojo.

como gafas apropiadas con lentes oscuros, careta, guantes y ropa de protección. La conexión adecuada de las mangueras a los cilindros también es un aspecto importante de la seguridad; los cilindros del oxígeno y el acetileno tienen roscas diferentes, por lo que las mangueras no pueden conectarse a los cilindros equivocados. El bajo costo del equipo es una característica atractiva de este proceso. Aunque puede ser mecanizada, la operación es de esencia manual, por lo que es lenta; sin embargo, tiene las ventajas de ser portátil, versátil y económica para trabajos sencillos y en poca cantidad.

Soldadura con gas a presión. En este método la soldadura de dos componentes comienza con el calentamiento de la interfase por medio de un soplete, por lo general con una mezcla de oxiacetileno (figura 30.3a). El soplete se retira cuando la interfase comienza a derretirse. Entonces se aplica fuerza para presionar los dos componentes y que se unan; así se mantienen hasta que se solidifica la interfase. Observe en la figura 30.3b la formación de una rebaba debido a la compresión de los extremos de los dos componentes que se unen.

Soldadura por termita. También se conoce como *termita* o *soldadura exotérmica* o *aluminotérmica* y se desarrolló en 1895. La soldadura por termita implica la mezcla de un metal en polvo con un óxido metálico y el uso de una fuente de ignición de alta

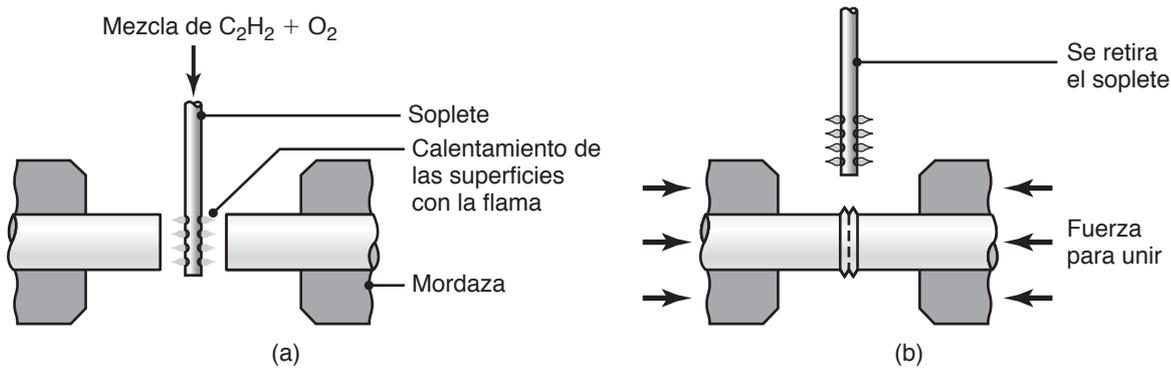


FIGURA 30.3 Ilustración esquemática del proceso de soldadura con gas a presión: (a) antes y (b) después; observe la formación de una rebaba en la unión; que puede eliminarse después.

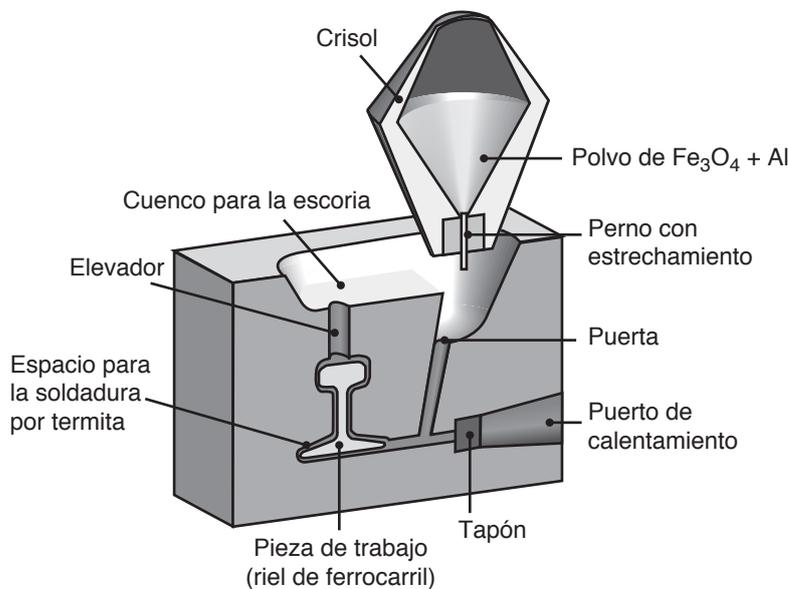


FIGURA 30.4 Ilustración esquemática de soldadura por termita.

temperatura con el fin de causar una reacción de oxidación-reducción (figura 30.4). Una forma común de efectuar este proceso es usar óxido de hierro (herrumbre) en polvo, en combinación con polvo de aluminio; al hacer ignición por medio de un encendedor de magnesio, la reacción química resultante forma óxido de aluminio (Al_2O_3) y hierro.

Las temperaturas llegan a alcanzar $2500\text{ }^\circ\text{C}$ ($4500\text{ }^\circ\text{F}$), lo que derrite el hierro que a su vez fluye hacia un cuenco para luego entrar a un molde colocado alrededor de las partes que se van a soldar. El óxido de aluminio flota hacia el cuenco de escoria debido a su baja densidad. Las características de un molde para soldadura por termita son muy similares a las de uno para fundición (vea la figura 11.3). En la figura 30.4, observe que hay un puerto de calentamiento, característica que permite la introducción de un soplete de oxiacetileno con el fin de precalentar las piezas de trabajo e impedir las grietas por soldadura (vea la sección 30.9.1).

En la soldadura por termita pueden usarse varias combinaciones de polvo y óxido, pero la de polvo de aluminio con óxido de hierro es la más común debido al uso tan extendido de la soldadura por termita para unir rieles de ferrocarril. Es frecuente que

se agreguen algunos óxidos de cobre y magnesio para mejorar la inflamabilidad. Entre otras aplicaciones de la soldadura por termita están la soldadura de conductores de cobre de gran diámetro, usando óxido de cobre, y la reparación en campo de grandes equipos como bastidores de ejes de locomotoras.

30.3 Procesos de soldadura por arco: electrodo no consumible

En la *soldadura por arco*, desarrollada a mediados del siglo XIX, el calor requerido se obtiene de la energía eléctrica. El proceso implica ya sea un *electrodo no consumible* o uno *consumible*. Un suministro de corriente alterna (CA) o corriente directa (CD) produce un arco entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo por soldar. El arco genera temperaturas de cerca de 30 000 °C (54 000 °F), mucho más elevadas que las que se obtienen en la soldadura con oxiacetileno.

En los procesos de soldadura con *electrodo no consumible*, es común que se use un **electrodo de tungsteno** (figura 30.5). Debido a las altas temperaturas involucradas, es necesaria una protección externa con el fin de impedir la oxidación de la zona que se suelda. Lo normal es usar *corriente directa* y, como se describe más adelante, es importante su **polaridad** (dirección del flujo de corriente). La selección de los niveles de corriente depende de factores tales como el tipo de electrodo, los metales por soldar y la profundidad y ancho de la zona por soldar.

En la **polaridad directa**, también conocida como *corriente directa de electrodo negativo* (DCEN, por sus siglas en inglés), la pieza de trabajo es el positivo (ánodo) y el electrodo es el negativo (cátodo). La DCEN por lo general produce soldaduras angostas

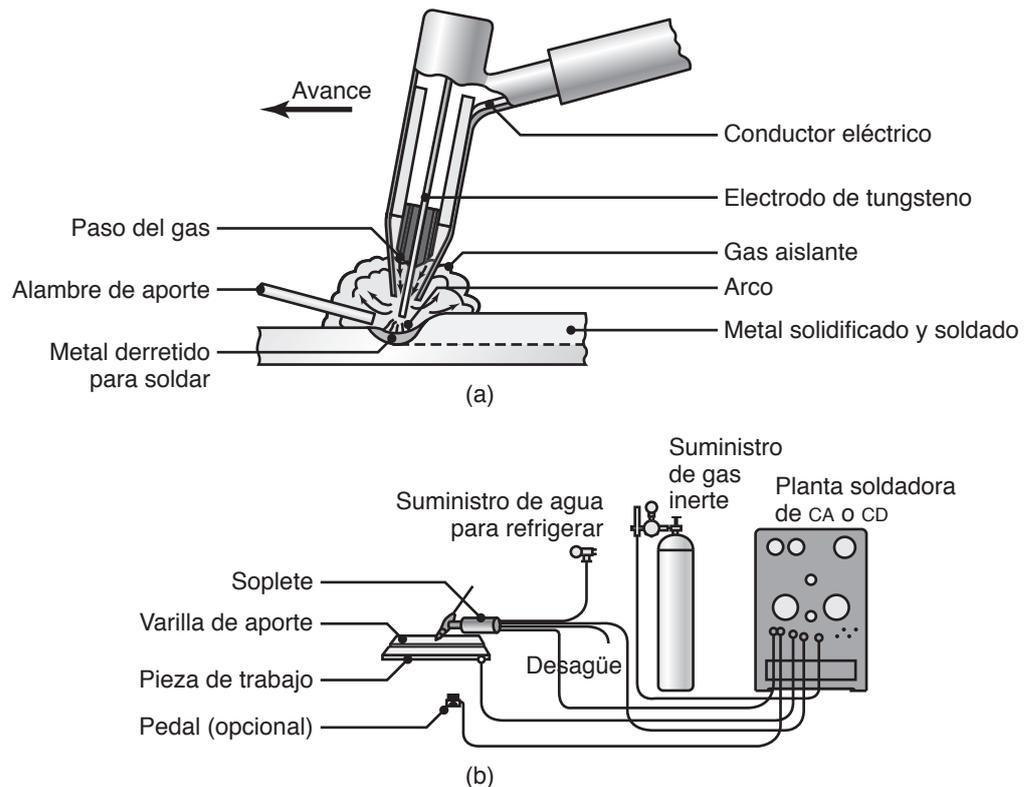


FIGURA 30.5 (a) Proceso de soldadura por arco de gas tungsteno, originalmente conocido como soldadura TIG (de gas tungsteno inerte). (b) Equipo para las operaciones de soldadura por arco de gas tungsteno.

y profundas (figura 30.6a). En la **polaridad inversa**, también conocida como *corriente directa de electrodo positivo* (DCEP, por sus siglas en inglés), la pieza de trabajo es el negativo y el electrodo es el positivo. La penetración de la soldadura es menor y la zona soldada es más superficial y más ancha (figura 30.6b); en consecuencia, la DCEP es preferible para placas metálicas y uniones con brechas muy anchas. En el método de **corriente alterna**, el arco pulsa con mucha rapidez. Este método es apropiado para soldar secciones gruesas y para usar electrodos de diámetro grande con corrientes máximas (figura 30.6c).

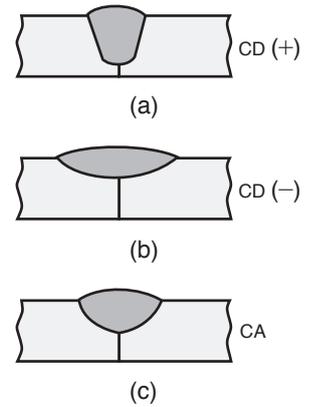


FIGURA 30.6 Efecto de la polaridad y tipo de corriente en los cordones de soldadura: (a) corriente directa con polaridad directa; (b) corriente directa con polaridad inversa y (c) corriente alterna.

Transferencia de calor en la soldadura de arco. La entrada de calor en la soldadura de arco está dada por la ecuación

$$\frac{H}{l} = e \frac{VI}{v}, \tag{30.3}$$

donde H es la entrada de calor (J o BTU), l es la longitud soldada, V es el voltaje aplicado, I es la corriente (amperes) y v es la velocidad de soldadura. El término e es la eficiencia del proceso, que varía desde alrededor de 75% para la soldadura por arco de electrodo revestido hasta 90% para la soldadura por arco de gas metálico y por arco sumergido. La eficiencia es una indicación de que no toda la energía disponible se aprovecha para fundir el material: el calor es conducido a través de la pieza de trabajo, una parte se disipa por radiación y otra más se pierde por convección al ambiente.

La transferencia de calor dada por la ecuación (30.3) derrite cierto volumen de material (por lo general del electrodo o metal de aporte), y también se expresa como

$$H = uV_m = uAl, \tag{30.4}$$

donde u es la energía específica requerida para derretir, V_m es el volumen de metal derretido y A es la sección transversal de la soldadura. En la tabla 30.2 se dan algunos valores comunes de u . Las ecuaciones (30.3) y (30.4) dan como resultado la expresión siguiente de la velocidad de soldadura:

$$u = e \frac{VI}{uA}. \tag{30.5}$$

Aunque estas ecuaciones se han desarrollado para la soldadura con arco, también es posible obtener formas similares para otras operaciones de soldadura por fusión si se toman en cuenta las diferencias en la geometría de la soldadura y la eficiencia del proceso.

TABLA 30.2

Energías específicas aproximadas que se requieren para fundir un volumen unitario de metales comunes por soldar

Material	Energía específica, u	
	J/mm ³	BTU/pulg ³
Aluminio y sus aleaciones	2.9	41
Hierros fundidos	7.8	112
Cobre	6.1	87
Bronce (90Cu-10Sn)	4.2	59
Magnesio	2.9	42
Níquel	9.8	142
Aceros	9.1-10.3	128-146
Aceros inoxidable	9.3-9.6	133-137
Titanio	14.3	204

Nota: 1 BTU = 1055; J = 778 pies-lb.

EJEMPLO 30.1 Velocidad de la soldadura para diferentes materiales

Dado: Considere un caso en el cual se efectúa una operación de soldadura, con $V = 20$ volts, $I = 200$ A y el área de la sección transversal de la soldadura es de 30 mm^2 .

Se solicita: Estimar la velocidad del proceso de soldadura si la pieza de trabajo y el electrodo están hechos de (a) aluminio; (b) acero al carbono y (c) titanio. Suponga una eficiencia del 75 por ciento.

Respuesta: Para el aluminio, a partir de la tabla 30.2, la energía específica requerida es $u = 2.9 \text{ J/mm}^3$. Enton-

ces, de la ecuación (30.5),

$$v = e \frac{VI}{uA} = (0.75) \frac{(20)(200)}{(2.9)(30)} = 34.5 \text{ mm/s.}$$

Igualmente, para acero al carbono se estima el valor de u como 9.7 J/mm^3 (el promedio de los valores extremos en la tabla), por lo que $v = 10.3 \text{ mm/s}$. Para el titanio, $u = 14.3 \text{ J/mm}^3$, de modo que $v = 7.0 \text{ mm/s}$.

Soldadura por arco de gas tungsteno. En la *soldadura por arco de gas tungsteno* (GTAW, por sus siglas en inglés), antes conocida como *soldadura TIG*, el metal de aporte es suministrado por un **alambre de aporte** (figura 30.5a). Debido a que el electrodo de tungsteno no se consume en esta operación, se mantiene una brecha constante y estable en el arco en un nivel constante de corriente. Los metales de aporte son similares a los metales por soldarse, no se usa fundente. El gas protector por lo general es argón o helio, o una mezcla de ambos. La GTAW puede hacerse sin metales de aporte, como en la soldadura de juntas cercanas.

Según los metales por unir, el suministro de corriente es CD a 200 A o bien CA a 500 A (figura 30.5b). La CA es preferible en general para el aluminio y el magnesio, ya que la acción limpiadora de la CA remueve los óxidos y mejora la calidad de la soldadura. Puede usarse torio o circonio en los electrodos de tungsteno con el fin de mejorar sus características de emisión de electrones. El suministro de energía va de 8 a 20 kW. La contaminación del electrodo de tungsteno debido al metal fundido puede ser un problema importante, en particular en aplicaciones críticas porque causa discontinuidades en la soldadura; por lo anterior, debe evitarse el contacto del electrodo con el charco de metal fundido.

El proceso de soldadura por arco de gas tungsteno se utiliza para una amplia variedad de aplicaciones y metales, en particular aluminio, magnesio, titanio y los metales refractarios; es apropiado especialmente para metales delgados. El costo del gas inerte hace que este proceso sea más caro que la soldadura por arco de electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés), pero proporciona soldaduras de muy alta calidad y buen acabado superficial. La GTAW se usa en varias aplicaciones críticas, con un amplio rango de espesores y formas de la pieza de trabajo y el equipo es portátil.

Soldadura con arco de plasma. En la *soldadura con arco de plasma* (PAW, por sus siglas en inglés), desarrollada en la década de 1960, se produce un arco de plasma concentrado y se dirige hacia el área de la soldadura. El arco es estable y alcanza temperaturas de hasta 33 000 °C (60 000 °F). Un **plasma** es un gas caliente ionizado compuesto de cantidades casi iguales de electrones y de iones. El plasma se inicia entre el electrodo de tungsteno y el orificio por medio de un arco piloto de baja corriente. Lo que hace diferente la soldadura con arco de plasma de otros procesos es que el plasma está concentrado ya que se le fuerza a pasar a través de un orificio relativamente pequeño. Las corrientes operativas suelen estar debajo de 100 A, pero para aplicaciones especiales pueden ser mayores. Cuando se utiliza un metal de aporte se alimenta dentro del arco, como en la GTAW. La protección del arco y de la zona de soldadura se suministra por medio de un anillo de protección externa y el uso de gases como argón, helio o mezclas.

Hay dos métodos de soldadura con arco de plasma:

- En el método de **arco transferido** (figura 30.7a), la pieza de trabajo que se suelda es parte del circuito eléctrico. El arco se transfiere del electrodo a la pieza de trabajo, de ahí el término *transferido*.
- En el método **no transferido** (figura 30.7b), el arco ocurre entre el electrodo y la boquilla y el calor es llevado a la pieza de trabajo por el plasma gaseoso. Este mecanismo de transferencia térmica es similar al de una flama de oxicomcombustible (vea la sección 30.2).

En comparación con otros procesos de soldadura con arco, la que se realiza con arco de plasma tiene mejor estabilidad en el arco, menos distorsión térmica y mayor concentración de energía, lo que permite soldaduras más profundas y angostas. Además es posible alcanzar mayores velocidades de soldadura, de 120 a 1000 mm/min (5 a 40 pulg/min). Se pueden soldar varios metales con espesores de la parte generalmente menores a 6 mm (0.25 pulg).

La gran concentración de calor puede penetrar completamente a través de la unión (lo que se conoce como **técnica ojo de cerradura**), con espesores de hasta 20 mm (0.75 pulg) para ciertas aleaciones de titanio y aluminio. En esta técnica la fuerza del arco de plasma desplaza el metal fundido y produce un orificio en el borde guía del charco de soldadura. La soldadura con arco de plasma (en lugar del proceso por

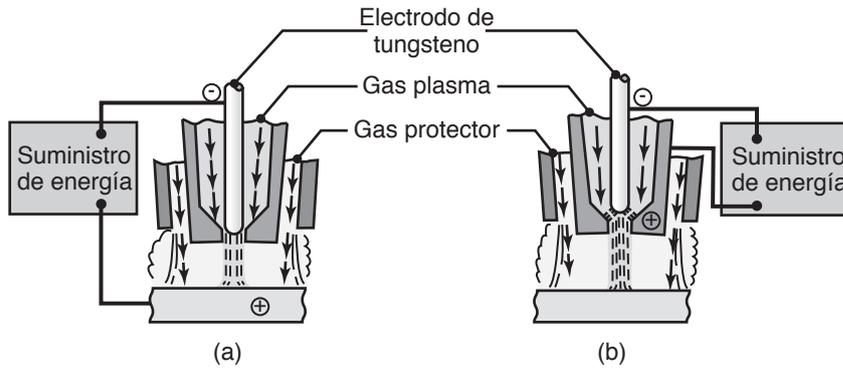


FIGURA 30.7 Dos tipos de procesos de soldadura con arco de plasma: (a) transferido y (b) no transferido; con estos procesos pueden hacerse soldaduras profundas y angostas a grandes velocidades.

arco de gas tungsteno) se usa con frecuencia para hacer uniones de empalme y vuelta debido a su mayor concentración de energía, mejor estabilidad del arco y mayores velocidades de soldadura. Son esenciales la capacitación apropiada y la habilidad para usar este equipo; las consideraciones de seguridad incluyen la protección contra el brillo, las salpicaduras y el ruido del arco de plasma.

Soldadura con hidrógeno atómico. En la *soldadura con hidrógeno atómico* (AHW, por sus siglas en inglés), se genera un arco entre dos electrodos de tungsteno en una atmósfera protectora de hidrógeno gaseoso. El arco se mantiene con independencia de las partes que se sueldan. El hidrógeno gaseoso normalmente es diatómico (H_2), pero donde las temperaturas son superiores a $6000\text{ }^\circ\text{C}$ ($11\ 000\text{ }^\circ\text{F}$), cerca del arco, el hidrógeno se rompe en su forma atómica, por lo que simultáneamente absorbe una gran cantidad de calor del arco. Cuando el hidrógeno golpea la superficie relativamente fría de las piezas de trabajo por unir, se recombina en su forma diatómica y libera con rapidez el calor almacenado y alcanza temperaturas de hasta $4000\text{ }^\circ\text{C}$. De ahí que sea uno de los pocos procesos que se usan para soldar tungsteno. La energía en el AHW puede variarse con facilidad al cambiar la distancia entre la corriente del arco y la superficie de la pieza de trabajo.

30.4 Procesos de soldadura por arco: electrodo consumible

Hay varios procesos de soldadura por arco y electrodo consumible, como se describe a continuación.

30.4.1 Soldadura por arco de electrodo revestido

La *soldadura por arco de electrodo revestido* (SMAW) es uno de los procesos de unión más antiguos, sencillos y versátiles; en consecuencia, alrededor de 50% de toda la soldadura industrial y de mantenimiento se lleva a cabo con este proceso. El arco eléctrico se genera cuando la punta de un *electrodo recubierto* toca la pieza de trabajo y luego se retira con rapidez a una distancia suficiente para mantener el arco (figura 30.8b). Los electrodos tienen forma de varillas cilíndricas delgadas y largas (de ahí que al proceso también se lo conozca como *soldadura de varilla*) que se operan manualmente.

El calor generado funde una porción de la punta del electrodo, su recubrimiento, y la base metálica en el área inmediata al arco. El metal fundido consiste en una mezcla de la base metálica (la pieza de trabajo), el electrodo de metal, y sustancias del recubrimiento del electrodo; esta mezcla forma la soldadura cuando se solidifica. El recubri-

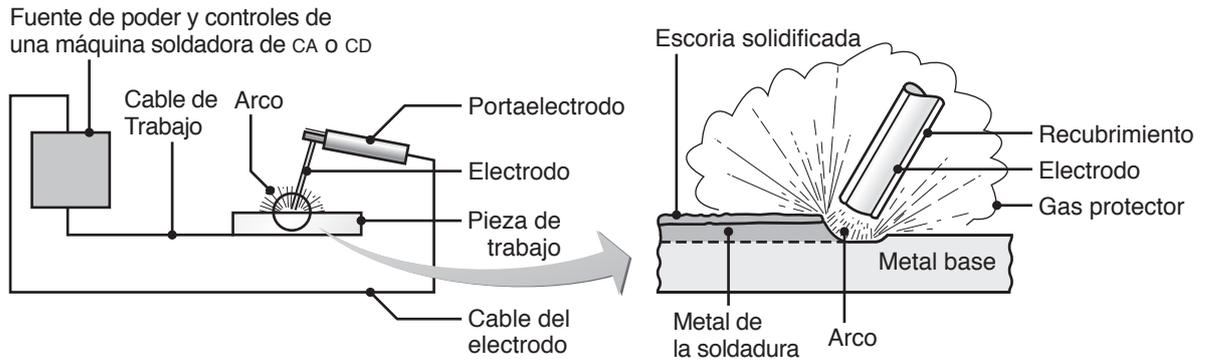


FIGURA 30.8 (a) Ilustración esquemática del proceso de soldadura por arco de electrodo revestido; alrededor de 50% de todas las operaciones de soldadura industrial a gran escala usan este proceso. (b) Detalle de la zona de soldadura en el proceso por arco de electrodo revestido.

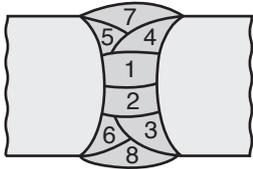


FIGURA 30.9 Soldadura de sección gruesa (profunda); muestra la secuencia de elaboración de ocho cordones individuales de soldadura.

miento del electrodo desoxida el área de soldadura y proporciona un gas aislante que la protege del oxígeno en el ambiente.

Una sección sin recubrimiento del extremo del electrodo se sujeta a una terminal de la fuente de poder, mientras que la otra terminal se conecta a la pieza de trabajo que se suelda (figura 30.8a). La corriente, que puede ser directa o alterna, por lo general está en el rango de 50 a 300 A. Para la soldadura de placas metálicas es preferible la CD por el arco estable que produce. Los requerimientos de energía por lo general son menores de 10 kW.

El equipo consiste en una fuente de poder, cables y un portaelectrodo. El proceso de soldadura por arco de electrodo revestido se usa comúnmente en la construcción general, armado de barcos, ductos y trabajos de mantenimiento. Es especialmente útil para trabajar en áreas remotas en las que puede usarse un generador portátil movido por combustible como fuente de poder. Este proceso es más apropiado para piezas cuyos espesores van de 3 a 19 mm (0.12 a 0.75 pulg), aunque este rango se amplía fácilmente con operadores hábiles mediante el uso de técnicas de *pasos múltiples* (figura 30.9).

El enfoque de pasos múltiples requiere que la escoria se remueva después de cada capa de soldadura. A menos que se retire por completo, la escoria solidificada ocasiona la corrosión severa del área soldada (lo que lleva a la falla de la soldadura), también impide la fusión de las capas soldadas y compromete la resistencia de la soldadura. La escoria puede retirarse, por ejemplo, con cepillado de alambre o el martilleo de la soldadura; en consecuencia, son elevados tanto los costos de la mano de obra como los del material.

30.4.2 Soldadura por arco sumergido

En la *soldadura por arco sumergido* (SAW, por sus siglas en inglés), el arco está protegido por un fundente granular que consiste en cal, sílice, óxido de manganeso, fluoruro de calcio y otros compuestos. El fundente se alimenta a la zona de la soldadura desde una tolva, por gravedad y a través de una boquilla (figura 30.10). La capa gruesa de fundente cubre por completo al metal fundido e impide que salpique y salgan chispas, así como también suprime la intensa radiación ultravioleta y el humo característicos del proceso de soldadura por arco de electrodo revestido. El fundente también actúa como aislante térmico y facilita la penetración profunda de calor en la pieza de trabajo.

El electrodo consumible es una bobina de alambre desnudo, cilíndrico, de 1.5 a 10 mm ($\frac{1}{16}$ a $\frac{3}{8}$ pulg) de diámetro, y se alimenta de manera automática a través de un tubo (*pistola soldadora*). Las corrientes eléctricas por lo general están en el rango de 300 a 2000 A, pero ciertos arreglos de arco múltiple pueden llegar a ser de 5000 A. Las fuentes de poder generalmente están conectadas a líneas eléctricas de una fase o de tres, con especificación principal de hasta 440 V.

Debido a que el fundente es alimentado por gravedad, el proceso de soldadura por arco sumergido está muy limitado a soldaduras en posición plana u horizontal que tengan algún apoyo. Es posible hacer soldaduras circulares en tubos y cilindros, siempre que se giren

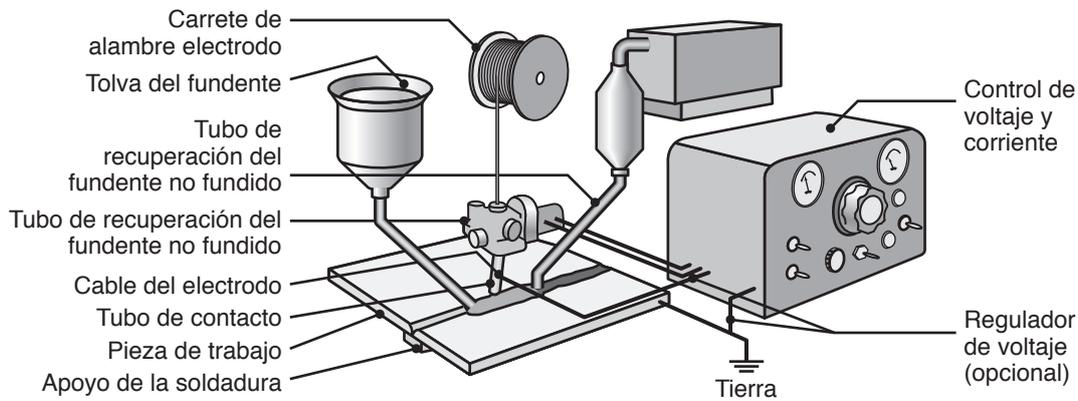


FIGURA 30.10 Ilustración esquemática del proceso de soldadura por arco sumergido y su equipo; el fundente no fundido se recupera y reutiliza.

durante la soldadura. Como se ilustra en la figura 30.10, el fundente no fundido puede recuperarse, tratarse y reutilizarse; es común que se recupere de 50 a 90% del fundente. La SAW es automática y se usa para soldar una variedad de aceros al carbono y aleaciones, así como lámina o placas de acero inoxidable a velocidades de hasta 5 m/min (16 pies/min), y ocasionalmente se usa para aleaciones base níquel. La calidad de la soldadura es muy alta, con buena robustez, ductilidad y uniformidad en sus propiedades. El proceso de SAW proporciona una productividad muy alta de la soldadura, pues deposita de 4 a 10 veces más cantidad de metal soldado por hora que el proceso de SMAW. Las aplicaciones comunes incluyen la soldadura de placas gruesas en el armado de navíos y de recipientes a presión.



Código QR 30.1 Conjunto de la soldadura de una muesca angosta con arco metálico. (Fuente: Cortesía de EWI).

30.4.3 Soldadura por arco de gas metálico

En la *soldadura por arco de gas metálico* (GMAW, por sus siglas en inglés) desarrollada en la década de 1950 y llamada en sus orígenes *soldadura metálica con gas inerte* (MIG, por sus siglas en inglés), el área de soldadura se protege con una atmósfera realmente inerte de argón, helio, dióxido de carbono u otras mezclas de gases (figura 30.11a). El alambre desnudo consumible se alimenta en forma automática a través de una boquilla en el arco de soldadura por medio de un motor de alimentación (figura 30.11b). Además de usar gases inertes como protección, por lo general en el propio electrodo hay antioxidantes para impedir la oxidación del charco de soldadura fundida. En la unión también pueden depositarse múltiples capas fundidas.

El metal se puede transferir con tres métodos:

1. **Transferencia por rociado (aspersión):** se transfieren pequeñas gotas de metal fundido desde el electrodo al área de soldadura, a razón de varios cientos de gotas por segundo; la transferencia está libre de salpicaduras y es muy estable. Se utilizan intensas CD y voltajes, así como electrodos de gran diámetro, con argón o una mezcla de gases rica en argón como protección. La corriente promedio requerida en este proceso se puede reducir utilizando un arco pulsante, que impone pulsos de gran amplitud sobre una corriente baja y estable. El proceso se puede usar en todas las posiciones de soldadura.
2. **Transferencia globular:** se utilizan gases ricos en dióxido de carbono y se impulsan glóbulos por medio de las fuerzas de transferencia del arco eléctrico del metal, lo que da por resultado considerables salpicaduras. Se emplean grandes corrientes de soldadura, lo que hace posible una penetración más profunda de la soldadura, y las velocidades de soldadura son mayores que en la transferencia por rociado. Con este método es común soldar secciones gruesas.
3. **Cortocircuito:** se transfiere metal en gotas individuales (más de 50 por segundo) conforme la punta del electrodo toca el metal fundido y hace corto circuito. Se utilizan corrientes y voltajes de baja intensidad, con gases ricos en dióxido de carbono, así como electrodos hechos con alambre de pequeño diámetro; la potencia que se requiere es de alrededor de 2 kW.



Código QR 30.2 GMAW de titanio. (Fuente: Cortesía de EWI).

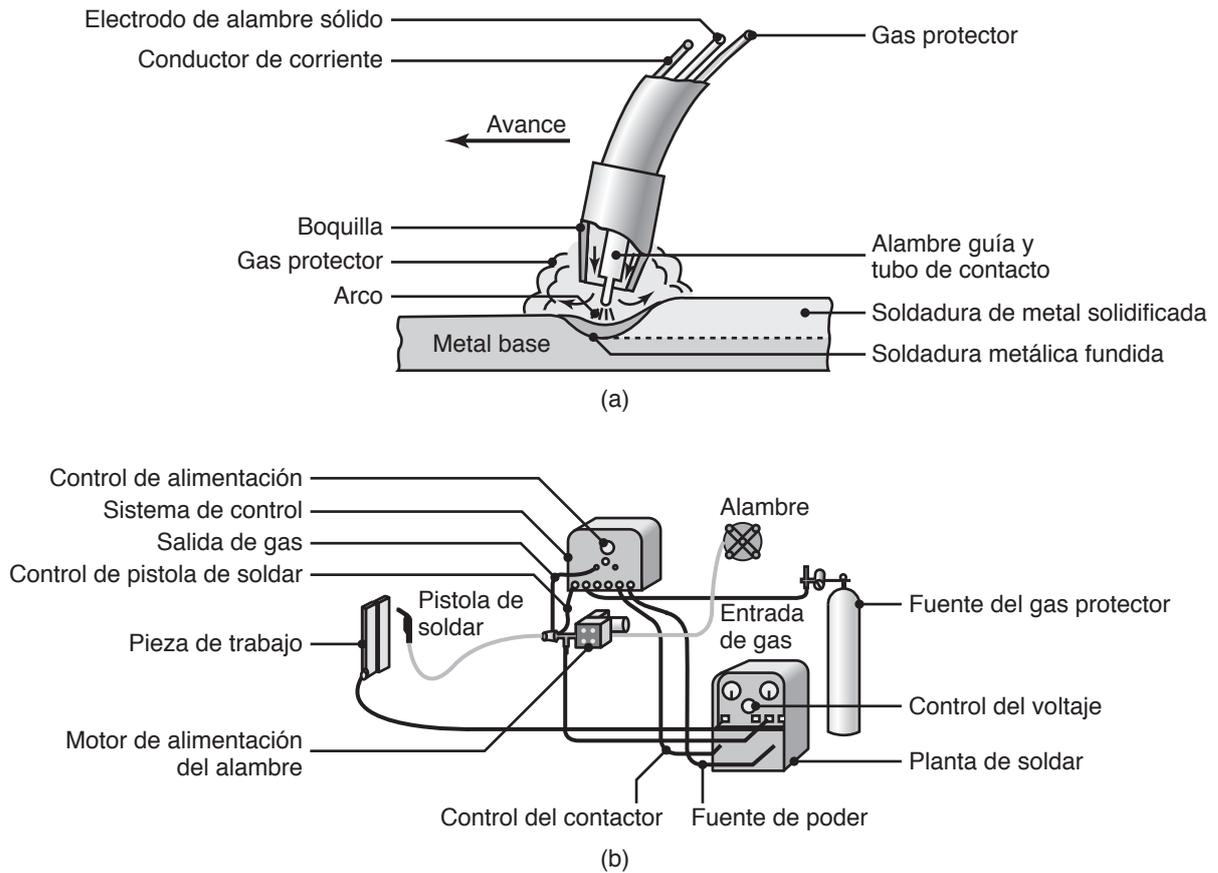


FIGURA 30.11 (a) Ilustración esquemática del proceso de soldadura por arco de gas metálico (GMAW), conocido en sus orígenes como MIG (por las siglas en inglés de gas metálico inerte). (b) Equipo básico de uso en las operaciones de soldadura por arco de gas metálico.

Las temperaturas que se generan en el GMAW son relativamente bajas; en consecuencia, este método es apropiado sólo para placas y secciones delgadas de menos de 6 mm (0.25 pulg); de otro modo puede haber una fusión incompleta. La operación, que es fácil de realizar, se usa comúnmente para soldar metales ferrosos en secciones delgadas. Los sistemas de arco pulsante se utilizan para metales delgados ferrosos y no ferrosos.

El proceso GMAW es adecuado para soldar la mayoría de metales ferrosos y no ferrosos y se emplea mucho en la industria de la fabricación de metales. Debido a la naturaleza relativamente simple del proceso, es fácil capacitar a los operadores. El proceso es versátil, rápido y económico, y la productividad de la soldadura es del doble que la de SMAW. El proceso GMAW se puede automatizar fácilmente y es posible trasladarlo a sistemas robotizados y de manufactura flexible (capítulos 37 y 39).

30.4.4 Soldadura de arco con núcleo fundente

El proceso de *soldadura de arco con núcleo fundente* (FCAW, por sus siglas en inglés), ilustrado en la figura 30.12, es similar a la soldadura por arco de gas metálico, excepto que el electrodo tiene forma tubular y está relleno de fundente, de ahí el nombre de *núcleo fundente*. Los electrodos de núcleo fundente producen un arco más estable, mejoran el contorno de la soldadura y producen mejores propiedades mecánicas de la unión. El fundente en estos electrodos es mucho más flexible que el recubrimiento frágil utilizado en los electrodos del SMAW, por lo que el electrodo tubular se suministra en bobinas de gran longitud.

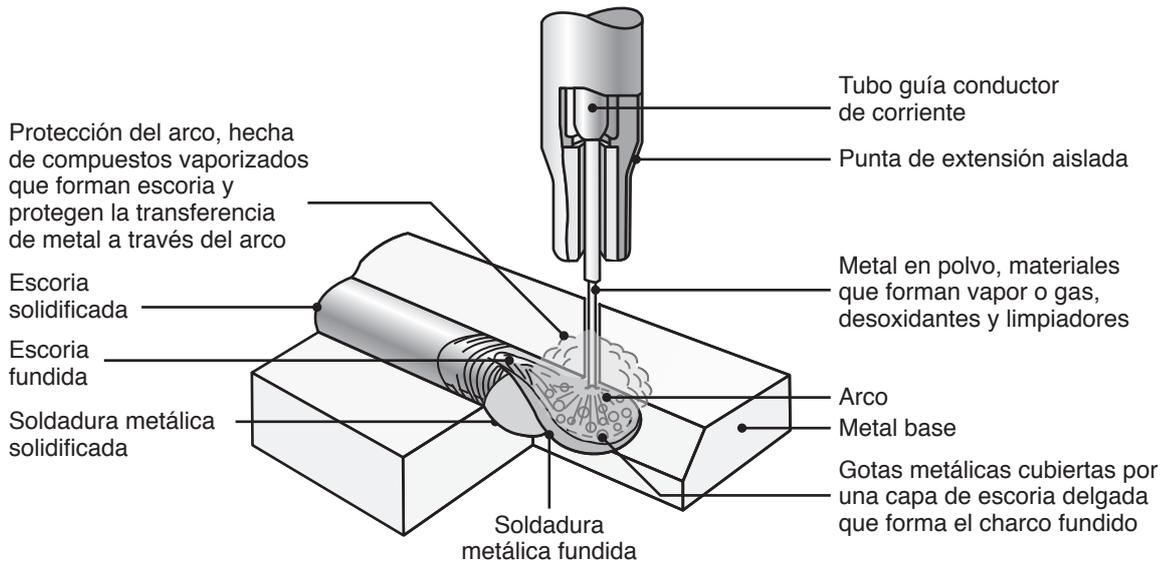


FIGURA 30.12 Ilustración esquemática del proceso de soldadura de arco con núcleo fundente; esta operación es semejante a la soldadura por arco de gas metálico, que se muestra en la figura 30.11.

Los electrodos suelen tener un diámetro de 0.5 a 4 mm (0.020 a 0.15 pulg) y la potencia requerida es de alrededor de 20 kW. También existen electrodos con núcleo autoprotectidos; éstos no requieren ninguna protección externa de gas debido a que contienen fundentes emisores que aíslan el área de soldado de la atmósfera circundante. Los electrodos de pequeño diámetro han hecho que con frecuencia la soldadura de materiales delgados no sólo sea posible sino preferible. Asimismo, los electrodos de diámetro chico hacen relativamente fácil soldar partes en diferentes posiciones y la química del flujo permite la soldadura de muchos metales.

El proceso FCAW combina la versatilidad del proceso SMAW con la característica de alimentación continua y automática del electrodo de la GMAW. El proceso es económico y versátil, por lo que se utiliza para soldar una diversidad de uniones, sobre todo de aceros, aceros inoxidable y aleaciones base níquel. La tasa de deposición más elevada del proceso FCAW, en comparación con el de GMAW, ha llevado a que se utilice para unir secciones de todos los espesores. El uso de *electrodos tubulares* con diámetros muy pequeños ha extendido el uso de este proceso a piezas de sección pequeña.

Una gran ventaja de la soldadura de arco con núcleo fundente es la facilidad con que pueden desarrollarse químicas específicas de metales para soldar. Por medio de agregar elementos de aleación al núcleo fundente, es posible producir virtualmente aleaciones de cualquier composición. El proceso es fácil de automatizar y se adapta con facilidad a sistemas de manufactura flexible y robotizado.

30.4.5 Soldadura con electrogas

La *soldadura con electrogas* (EGW, por sus siglas en inglés) se emplea sobre todo para soldar los bordes de secciones, en forma vertical y en un solo paso, con las piezas colocadas borde con borde (*a tope*). Se clasifica como un proceso de *soldadura con máquina* ya que requiere equipo especial (figura 30.13). El metal para soldar se deposita en una cavidad de soldadura entre las dos piezas por unir. El espacio está limitado por dos *diques* de cobre de agua fría (llamados *zapatitas de respaldo*) para impedir fugas de la escoria derretida; impulsores mecánicos mueven las zapatas de respaldo hacia arriba. También es posible hacer soldaduras en forma de circunferencia, como las de tubos, con la pieza de trabajo en rotación.

A través de un conducto se alimentan electrodos únicos o múltiples y se mantiene un arco continuo con el empleo de electrodos con núcleo fundente hasta a 750 A, o elec-

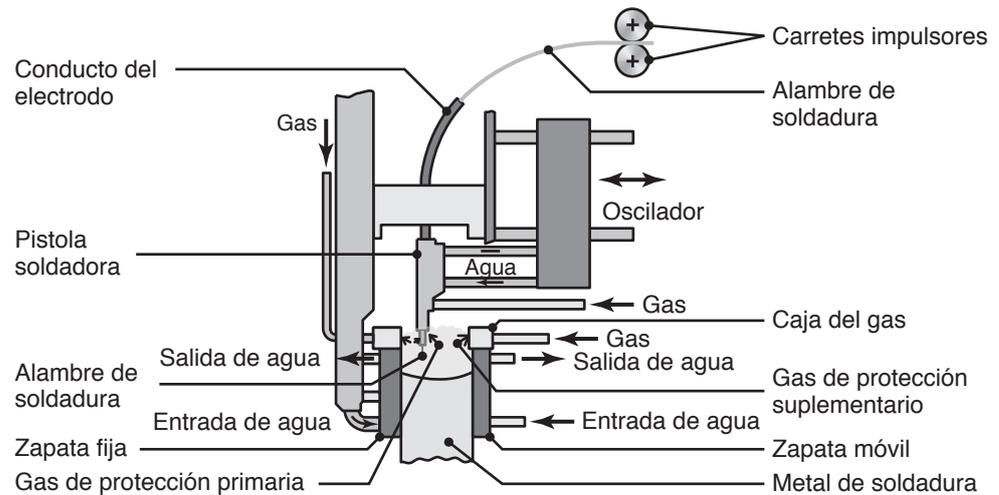


FIGURA 30.13 Ilustración esquemática del proceso de soldadura con electrogas.

trodos sólidos a 400 A. Los requerimientos de potencia son de alrededor de 20 kW. La protección se lleva a cabo por medio de un gas inerte, como dióxido de carbono, argón o helio, lo que depende del tipo de material que se suelde. El gas puede abastecerse ya sea desde una fuente externa o de un electrodo con núcleo fundente, o a partir de ambos.

El espesor de la soldadura va de 12 a 75 mm (0.5 a 3 pulg) en aceros, titanio y aleaciones de aluminio. Las aplicaciones comunes son en la construcción de puentes, recipientes de presión, tubos de paredes gruesas y diámetros grandes, tanques de almacenamiento y navíos. El equipo para este proceso es confiable y la capacitación de los operadores es relativamente sencilla.

30.4.6 Soldadura con electroescoria

La *soldadura con electroescoria* (ESW, por sus siglas en inglés) y sus aplicaciones son semejantes a las de la soldadura con electrogas (figura 30.14), la principal diferencia es que el arco arranca entre la punta del electrodo y la parte inferior de la parte por soldar. Se agrega fundente, que se funde por el calor del arco. Una vez que la escoria fundida alcanza la punta del electrodo, el arco se extingue. El calor se produce continuamente debido a la resistencia eléctrica de la escoria derretida. Como el arco está apagado, la ESW no es estrictamente un proceso de soldadura con arco. Puede usarse un electrodo o varios, al igual que con núcleo fundente. La guía puede ser no consumible (método convencional) o consumible.

La soldadura con electroescoria es capaz de soldar placas con espesores que van de 50 mm a más de 900 mm (2 a 36 pulg) y hacerlo en un solo paso. La corriente requerida es de alrededor de 600 A, con 40 a 50 V, aunque para placas gruesas se emplean corrientes más intensas. La velocidad de avance de la soldadura está en el rango de 12 a 36 mm/min (0.5 a 1.5 pulg/min). Este proceso se utiliza para grandes secciones de acero estructural, como el de la maquinaria pesada, puentes, plataformas petroleras, barcos y navíos de propulsión nuclear. La calidad de la soldadura es buena.

30.5 Electrodo para soldadura por arco

Los *electrodos* para los procesos consumibles de soldadura por arco se clasifican de acuerdo con las siguientes propiedades:

- Resistencia de la soldadura metálica depositada.
- Corriente (CA o CD).
- Tipo de recubrimiento.

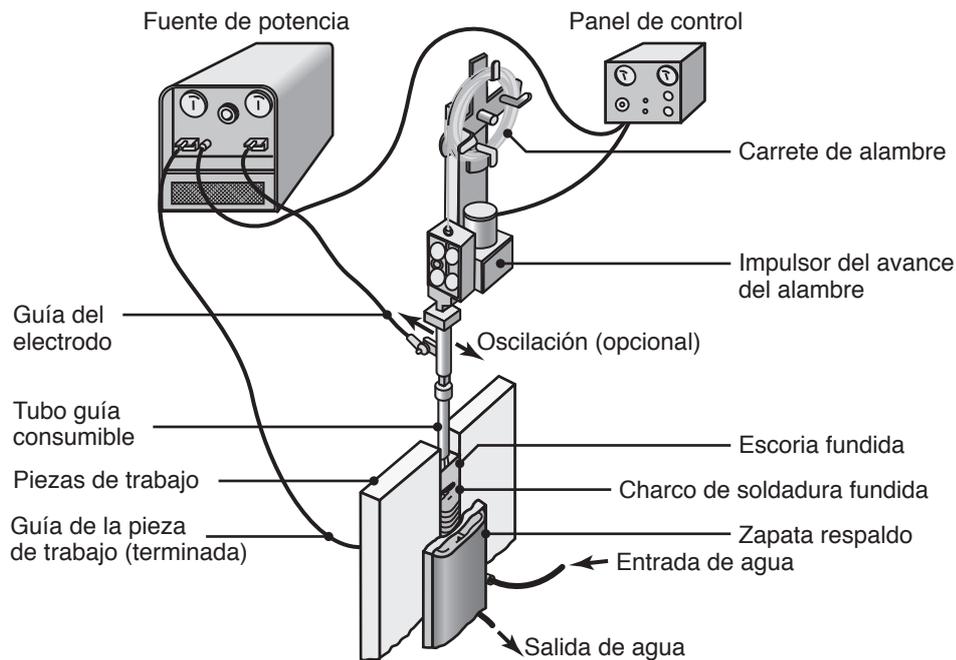


FIGURA 30.14 Equipo utilizado para las operaciones de soldadura con electroescoria.

Los electrodos se identifican con números y letras (tabla 30.3), o con un código de colores si los números y letras fueran demasiado pequeños para imprimirse. Las dimensiones normales de los electrodos recubiertos están en el rango de 150 a 460 mm (6 a 18 pulg) de longitud y diámetro de 1.5 a 8 mm ($\frac{1}{16}$ a $\frac{5}{16}$ de pulg).

Las especificaciones para los electrodos y metales de aporte, inclusive sus tolerancias dimensionales, procedimientos de control de calidad y procesos, los publica la American Welding Society (AWS) y el American National Standards Institute (ANSI). Algunas especificaciones están disponibles en las Aerospace Materials Specifications (AMS) de la Society of Automotive Engineers (SAE). Los electrodos se venden por peso y los hay en una amplia variedad de tamaños y especificaciones. Los criterios para su selección y recomendaciones para un metal en particular y su aplicación se pueden encontrar en la bibliografía del proveedor y en varios manuales y referencias que se listan al final de este capítulo.

Recubrimientos de los electrodos. Los electrodos están recubiertos con materiales arcillosos que incluyen aglutinantes y materiales en polvo, como óxidos, carbonatos, fluoruros, aleaciones metálicas, celulosa de algodón y aserrín. El recubrimiento, que es frágil y toma parte en interacciones complejas durante la soldadura, tiene las siguientes funciones básicas:

- Estabilizar el arco.
- Generar gases que actúen como protección contra la atmósfera circundante; los gases producidos son dióxido de carbono, vapor de agua y pequeñas cantidades de monóxido de carbono e hidrógeno.
- Controlar la tasa a que se funde el electrodo.
- Actuar como un fundente para proteger la soldadura contra la formación de óxidos, nitruros y otras inclusiones y, con la escoria resultante, proteger el charco de soldadura derretida.
- Agregar elementos de aleación a la zona de la soldadura para mejorar las propiedades de la unión; entre estos elementos están los desoxidantes para prevenir que la soldadura se torne quebradiza.

TABLA 30.3**Nomenclatura para electrodos de acero de bajo carbono (dulce) recubiertos**

El prefijo “E” designa un electrodo para soldadura de arco. Los primeros dos dígitos de números de cuatro dígitos, y los primeros tres dígitos de números con cinco dígitos, indican la mínima resistencia a la tensión:

E60XX	60 000 psi
E70XX	70 000 psi
E110XX	110 000 psi

El dígito siguiente al último indica la posición:

EXX1X	Todas las posiciones
EXX2X	Posición plana y uniones horizontales

Los últimos dos dígitos indican el tipo de recubrimiento y la corriente a usar; el sufijo (ejemplo: EXXXX-A1) indica la aleación aproximada en el depósito de soldadura:

-A1	0.5% Mo
-B1	0.5% Cr, 0.5% Mo
-B2	1.25% Cr, 0.5% Mo
-B3	2.25% Cr, 1% Mo
-B4	2% Cr, 0.5% Mo
-B5	0.5% Cr, 1% Mo
-C1	2.5% Ni
-C2	3.25% Ni
-C3	1% Ni, 0.35% Mo, 0.15% Cr
-D1 y D2	0.25 a 0.45% Mo, 1.75% Mn
-G	0.5% mínimo de Ni, 0.3% mínimo de Cr, 0.2% mínimo de Mo, 0.1% mínimo de V, 1% mínimo de Mn (sólo se requiere un elemento)

Después de cada pasada debe removerse del electrodo el recubrimiento o escoria depositados con el fin de asegurar una buena soldadura. También existen electrodos y alambres desnudos, por lo general hechos de aceros inoxidable y aleaciones de aluminio, y se usan como metales de aporte en varias operaciones de soldadura.

30.6 Soldadura con haz de electrones

En la *soldadura con haz de electrones* (EBW, por sus siglas en inglés), desarrollada en la década de 1960, se genera calor por medio de electrones de alta velocidad en un haz angosto; la energía cinética de los electrones se convierte en calor cuando golpean la pieza de trabajo por soldar. Este proceso requiere equipo especial con el fin de centrar el haz sobre la pieza de trabajo, generalmente al vacío. Cuanto más grande sea el vacío más profundo penetra el haz y mayor es la razón de la profundidad al ancho de la soldadura; así, los métodos se llaman EBW-HV (por “alto vacío”) y EBW-MV (por “medio vacío”); algunos materiales también se pueden soldar con EBW-NV (por “sin vacío”).

Casi cualquier metal puede soldarse y los espesores de la pieza de trabajo varían desde hojas a placas. Las capacidades de los generadores de haces de electrones están en el rango de los 100 kW. La intensa energía también es capaz de producir agujeros en la pieza de trabajo (vea *técnica ojo de cerradura*, sección 30.3). Por lo general no se requiere un gas protector, fundente o metal de aporte.

El proceso de soldadura con haz de electrones tiene la capacidad de hacer soldaduras de alta calidad con lados casi paralelos, son profundas y angostas y tienen zonas pequeñas afectadas por el calor (vea la figura 30.15 y la sección 30.9). Las razones de profundidad a ancho están en el rango de 10 a 30. El tamaño de las soldaduras hechas con EBW

es mucho más pequeño que el de aquellas realizadas con procesos convencionales. Con el uso de la automatización y los servocontroles, es posible controlar con exactitud los parámetros de procesamiento a velocidades de soldadura tan elevadas como 12 m/min (40 pies/min).

Con este proceso casi cualquier metal puede soldarse (a tope o con traslape) y con espesores de hasta 150 mm (6 pulg). La distorsión y el encogimiento en el área de la soldadura son mínimos y la calidad de ésta es buena. Las aplicaciones comunes incluyen la soldadura de componentes de aeronaves, misiles, nucleares y electrónicos, así como engranes y ejes para la industria automotriz. El equipo para soldar con haz de electrones genera rayos X, por lo que son esenciales el monitoreo apropiado y un mantenimiento periódico.

30.7 Soldadura con rayo láser

La *soldadura con rayo láser* (LBW, por sus siglas en inglés) utiliza un rayo láser de alta potencia como fuente de calor para producir la soldadura por fusión. Debido a que se puede concentrar en un área muy pequeña, el rayo tiene una gran densidad de energía y capacidad para penetrar profundamente. El rayo láser puede ser dirigido, conformado y concentrado con precisión sobre la pieza de trabajo; los diámetros del punto láser pueden ser tan pequeños como 0.2 mm (0.008 pulg). En consecuencia, este proceso es particularmente apropiado para hacer soldaduras profundas y angostas en uniones (figura 30.15) con relaciones de profundidad a ancho que en general varían de 4 a 10.

La soldadura con rayo láser se ha extendido mucho y ahora se usa en la mayoría de las industrias. El rayo láser se puede **pulsar** (en milisegundos), con niveles de potencia de hasta 100 kW para aplicaciones como la soldadura de punto en materiales delgados. Los sistemas de láser **continuos** de varios kW se utilizan para hacer soldaduras profundas en secciones gruesas.

La soldadura con rayo láser produce trabajos de buena calidad con el mínimo de encogimiento o distorsión. Las soldaduras con láser tienen buena resistencia y por lo general son dúctiles y libres de porosidad. El proceso se puede automatizar para usarse en una variedad de materiales, con espesores de hasta 25 mm (1 pulg). Como se describió en la sección 16.2.2, los *formatos de láminas metálicas soldadas a la medida* se unen sobre todo mediante soldaduras con rayo láser, usando la robótica para tener un control preciso de la trayectoria del rayo.

Los metales y aleaciones que es común soldar con esta técnica incluyen aluminio, titanio, metales ferrosos, cobre, superaleaciones y metales refractarios. Las velocidades de soldadura van desde 2.5 m/min (8 pies/min) hasta una velocidad tan grande como 80 m/min (250 pies/min) para metales delgados. Dada la naturaleza del proceso, la soldadura puede realizarse en lugares que de otro modo serían inaccesibles. Igual que en otros sistemas de soldadura semejantes y automatizados, la habilidad que se requiere del operador es mínima. En la soldadura con rayo láser la seguridad es de importancia particular debido a los peligros extremos para los ojos y la piel. Los láseres de estado sólido (YAG) también son peligrosos (vea la tabla 27.2 acerca de los tipos de láseres).

Las principales ventajas de la soldadura con rayo láser sobre la soldadura con haz de electrones se resumen de la siguiente manera:

- No se requiere un vacío, y el rayo se puede transmitir a través del aire.
- Los rayos láser pueden conformarse, manipularse y enfocarse ópticamente por medio de fibra óptica, por lo que el proceso se puede automatizar fácilmente.
- Los rayos láser no generan rayos X.
- La calidad de la soldadura es mejor que la de haz de electrones; hay menos distorsión y la soldadura tiende menos hacia la fusión incompleta, salpicaduras y porosidad.

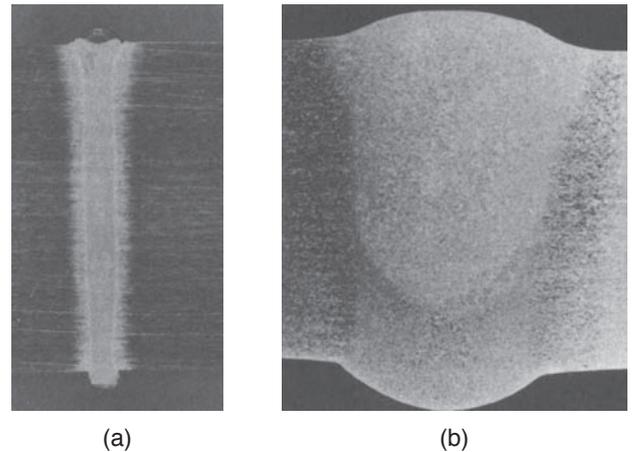


FIGURA 30.15 Comparación de (a) soldadura con haz de electrones y (b) soldadura por arco de gas tungsteno. Fuente: Volumen 3, *Welding Handbook, Welding Processes*, Parte 2, Miami: American Welding Society, p. 465. Impreso con autorización.

EJEMPLO 30.2 Soldadura con rayo láser de navajas de afeitar

En la figura 30.16 se muestra un acercamiento del rastrillo Gillette Sensor. Cada una de las dos navajas estrechas y de alta resistencia tiene 13 puntos de soldadura, 11 de los cuales se pueden ver en la fotografía (como puntos más oscuros con cerca de 0.5 mm de diámetro) en cada hoja. Las soldaduras están hechas con un láser de Nd:YAG equipado con conductor de fibra óptica. Este equipo provee una manipulación muy flexible y puede hacer blanco exacto a lo largo de la navaja. Con un equipo de estas máquinas, la producción es a razón de tres millones de soldadura por hora con exactitud y calidad constantes de la soldadura.

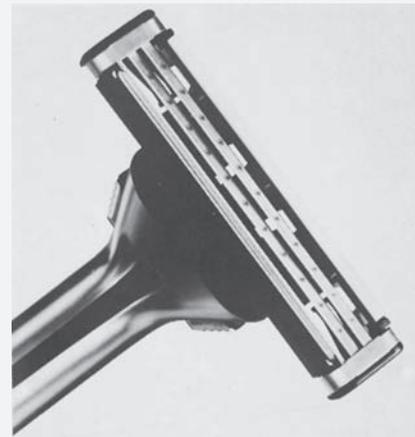


FIGURA 30.16 Detalle del rastrillo Gillette Sensor, en el cual se aprecian puntos de soldadura con láser.

Fuente: Basado en Lumonics Corporation, Industrial Products Division.



Código QR 30.3 Soldadura híbrida con láser. (*Fuente:* Cortesía de EWI).

Láser GMAW. El *láser GMAW* es una tecnología emergente de soldadura híbrida con láser que combina la zona angosta afectada por el calor de la soldadura láser con las altas tasas de deposición de la soldadura con arco metálico de gas. En este proceso, que se ilustra en la figura 30.17, el láser se enfoca en la pieza de trabajo adelante del arco GMAW, lo que resulta en una penetración profunda y permite grandes velocidades de recorrido. Además, el proceso es capaz de unir brechas más grandes que con la soldadura láser tradicional y la calidad metalúrgica de la soldadura mejora por la presencia del gas de protección.

30.8 Corte

Además de cortarse por medios mecánicos, como se describe en la parte IV de este libro, el material puede ser cortado en varios contornos por medio de una fuente de calor que derrite y remueve una zona angosta de la pieza de trabajo. Las fuentes de calor pueden ser sopletes, arcos eléctricos o láseres.



Código QR 30.4 Soldadura de arco con láser híbrido. (*Fuente:* Cortesía de EWI).

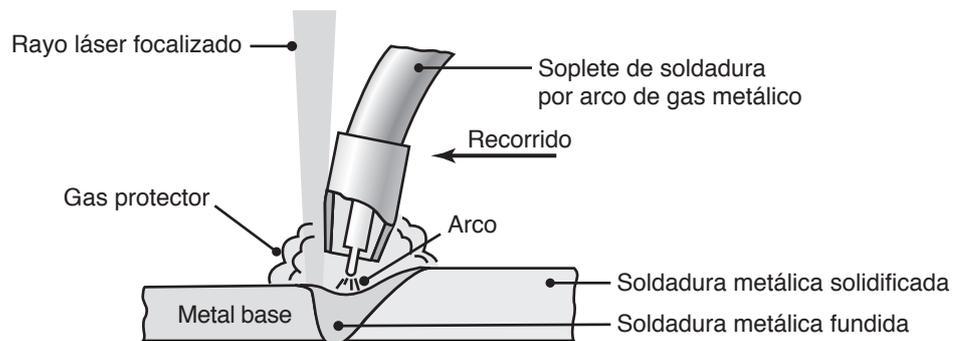
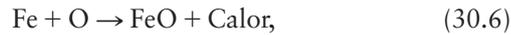
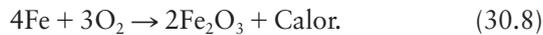


FIGURA 30.17 (a) Ilustración esquemática del proceso de soldadura GMAW híbrida con láser. *Fuente:* Cortesía de Lincoln Electric.

Corte con gas oxicomcombustible. El *corte con gas oxicomcombustible* (OFC, por sus siglas en inglés) es similar a la soldadura con gas oxicomcombustible (sección 30.2), pero la fuente de calor se utiliza ahora para *remover* una zona angosta de una placa u hoja metálica (figura 30.18a). Este proceso es particularmente apropiado para aceros, donde las reacciones básicas son las siguientes:



y



El calor más grande es generado por la segunda reacción, con temperaturas que llegan alrededor de 870 °C (1600 °F). Sin embargo, debido a que esta temperatura no es lo bastante alta, la pieza de trabajo se *precalienta* con gas combustible y el oxígeno se introduce después, como puede verse en la sección transversal de la boquilla en la figura 30.18a. Cuanto más alto sea el contenido de carbono en el acero, más elevada será la temperatura de precalentamiento que se requiere. El corte tiene lugar sobre todo por la oxidación (quemado) del acero; también hay algo de fusión. Los hierros fundidos y las fundiciones de acero también se pueden cortar con este método. El proceso genera una abertura o ranura (*kerf*), similar a la que se produce al cortar con una sierra o por electroerosión (o maquinado por descarga eléctrica) de hilo (vea la figura 27.12). Los anchos de abertura van desde alrededor de 1.5 hasta 10 mm (0.06 a 0.4 pulg), con un buen control de las tolerancias dimensionales. Sin embargo, la distorsión causada por la distribución irregular de las temperaturas puede ser un problema en el corte con gas oxicomcombustible.

El máximo espesor que puede cortarse con OFC depende sobre todo de los gases utilizados. Por ejemplo, con gas oxiacetileno el espesor máximo es de alrededor de 300 mm (12 pulg); con oxihidrógeno es cerca de 600 mm (24 pulg). La flama deja *líneas de arrastre* sobre la superficie cortada (figura 30.18b), lo que da como resultado una superficie más rugosa que la producida por procesos como el aserrado, troquelado u otras operaciones similares que usan herramientas de corte mecánico. El *corte bajo el agua* se realiza con sopletes diseñados especialmente que producen una capa de aire comprimido entre la flama y el agua circundante. Aunque se ha usado mucho para trabajos de rescate y reparación, el OFC es susceptible de emplearse también en la manufactura. Los sopletes se pueden guiar a lo largo de trayectorias específicas en forma manual, mecánica o automática con máquinas que usan controladores programables y robots.

Corte con arco. Los procesos de *corte con arco* se basan en los mismos principios que los de la soldadura de arco. Son varios los materiales que se pueden cortar a grandes velocidades por medio del corte con arco, aunque al igual que en la soldadura, estos procesos también dejan una zona afectada por el calor que necesita tomarse en cuenta, en particular en aplicaciones críticas.

En el *corte por arco de carbono con aire* (CAC-A), se usa un electrodo de carbono y el metal fundido se retira mediante un chorro de aire de alta velocidad. Este proceso se usa en especial para comprimir y *rascar* (remoción de metal de una superficie). Sin embargo, el proceso es ruidoso y el metal fundido puede salir lanzado a distancias considerables y convertirse en un riesgo para la seguridad.

El *corte con arco de plasma* (PAC, por sus siglas en inglés) produce las temperaturas más altas y se utiliza para el corte rápido de placas de acero no ferroso e inoxidable. La productividad del corte con este proceso es mayor que la de los métodos de gas oxicomcombustible. El PAC produce un buen acabado de la superficie, anchos de corte angostos y es el proceso de corte más común que utiliza controladores programables empleados en la manufactura de hoy. Los *haces de electrones* y *rayos láser* también se usan para hacer

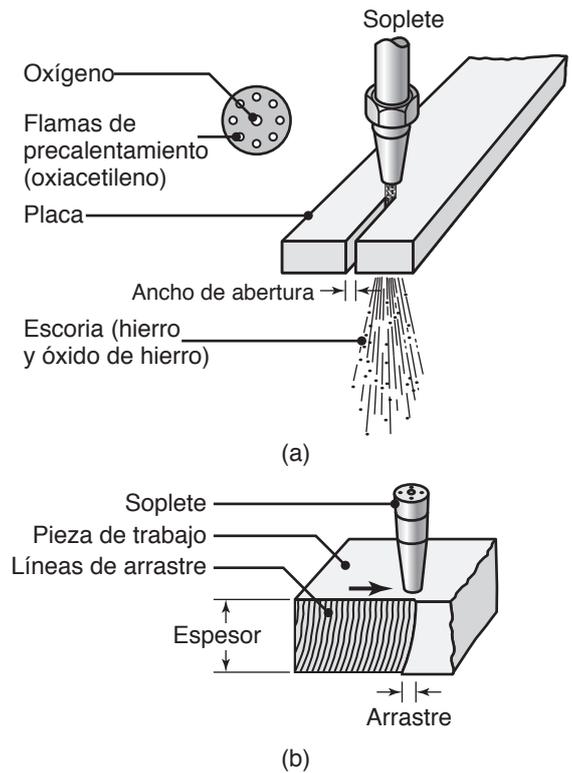


FIGURA 30.18 (a) Corte de flama de una placa de acero con soplete de oxiacetileno y sección transversal de la boquilla del soplete. (b) Sección transversal del corte con flama de una placa, donde se aprecian las líneas de arrastre.

cortes muy exactos en una amplia variedad de metales, como se describe en las secciones 27.6 y 27.7. El acabado de la superficie es mejor que el de otros procesos térmicos de corte y el ancho de corte es más angosto.

30.9 Unión soldada, calidad y prueba de la soldadura

En una unión soldada común se pueden identificar tres zonas distintas, como se aprecia en la figura 30.19:

1. Metal base.
2. Zona afectada por el calor.
3. Metal soldado.

La metalurgia y propiedades de la segunda y tercera zonas dependen mucho del tipo de metales que se unen, del proceso particular de la unión, de los metales de aporte usados (si los hubiera) y de las variables del proceso de soldadura. Recuerde que una unión producida sin utilizar un metal de aporte se llama *autógena* y su zona de soldadura está compuesta de un *metal base resolidificado*. Una unión elaborada con un metal de aporte tiene una zona central, llamada *metal soldado*, y está compuesta de una mezcla de los metales de base y aporte.

Solidificación del metal soldado. Después de aplicar calor e introducir el metal de aporte (si lo hubiera) en la zona de soldadura, se deja que la unión soldada se enfríe a la temperatura ambiente. El proceso de solidificación es semejante al de la fundición (sección 10.2) y comienza con la formación de granos *columnares (dendríticos)*, como se ve en la figura 10.3. Estos granos son relativamente largos y se forman paralelos al flujo de calor. Como los metales son mucho mejores conductores del calor que el aire circundante, los granos yacen *paralelos* al plano de los dos componentes por soldar (figura 30.20a). En contraste, en las figuras 30.20b y c se muestran los granos en una soldadura *superficial*.

La estructura y tamaño del grano dependen de la aleación específica de metal, del proceso particular de soldar empleado y del tipo de metal de aporte. Debido a que comenzó en un estado fundido, el metal soldado tiene básicamente una *estructura de colada* y, como se enfrió lentamente, tiene granos gruesos. En consecuencia, esta estructura por lo general tiene resistencia, tenacidad y ductilidad bajas. Sin embargo, con la selección apropiada de la composición del metal de aporte o de los tratamientos con calor, posteriores a la soldadura, es posible mejorar las propiedades mecánicas de la unión.

La estructura resultante depende de la aleación particular, su composición y ciclo térmico al que se sujeta la unión. Por ejemplo, las tasas de enfriamiento pueden ser controladas y reducidas por *precalentamiento* del área general de la soldadura antes de comenzar a soldar. El precalentamiento es importante, en particular para metales de conductividad térmica elevada como el aluminio y el cobre (tabla 3.2). Sin precalentamiento, el calor producido durante la soldadura se disipa con rapidez a través del resto de las partes que se unen.

Zona afectada por el calor. La *zona afectada por el calor* (HAZ, por sus siglas en inglés) está dentro del metal base en sí. Tiene una microestructura diferente de la del metal base antes de ser soldado, ya que se ha sujetado temporalmente a temperaturas elevadas durante la soldadura. Las porciones del metal base que están lejos de la fuente de calor no sufren cambios micros-

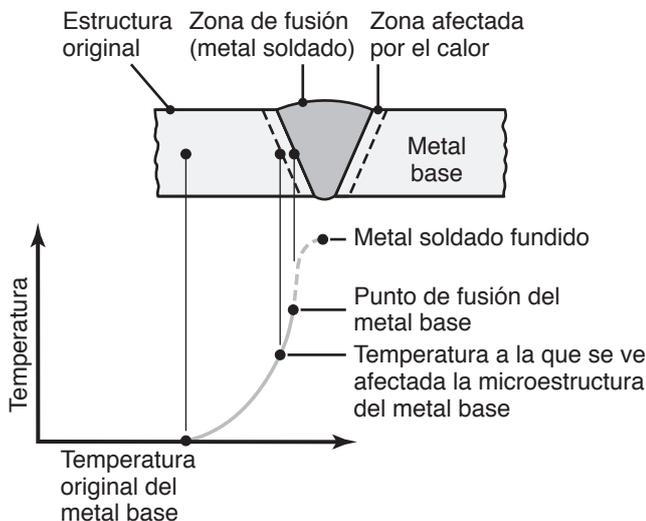


FIGURA 30.19 Características de una típica zona de soldadura de fusión en la soldadura por gas oxicom bustible y de arco.

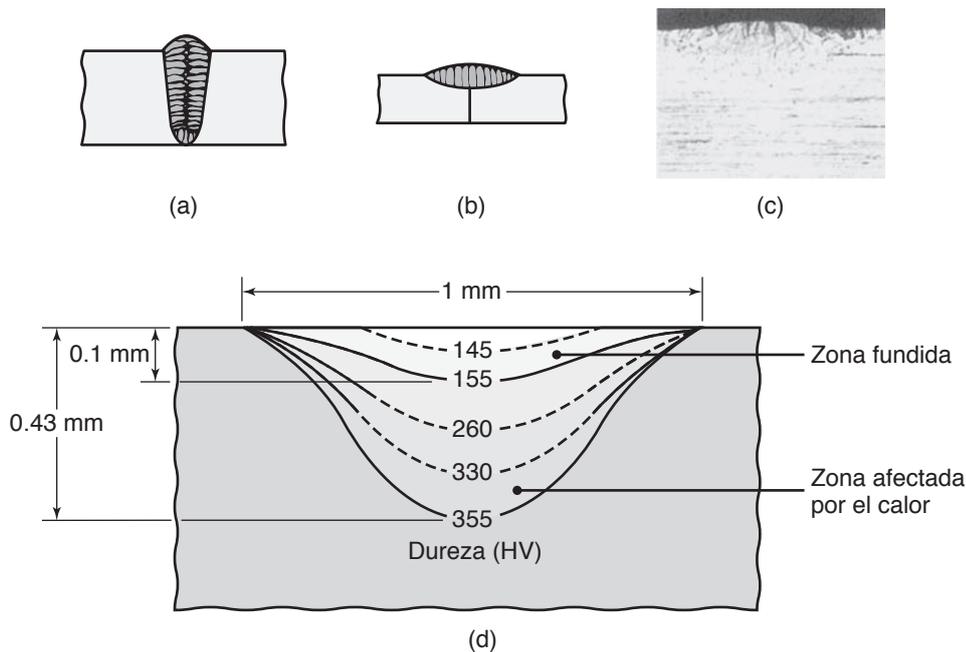


FIGURA 30.20 Estructura del grano en (a) una soldadura profunda y (b) una soldadura superficial; observe que los granos en el metal soldado solidificado son perpendiculares a su interfase con el metal base. (c) Cordón de soldadura en una tira de níquel rolando en frío, producida por un rayo láser. (d) Perfil de microdureza (HV) a través del cordón de soldadura.

estructurales durante la soldadura debido a la temperatura mucho más baja a que están sujetas.

Las propiedades y microestructura de la HAZ dependen de (a) la tasa de entrada de calor y del enfriamiento y (b) la temperatura a la que se ha elevado esta zona. Además de factores metalúrgicos (tamaño original del grano, orientación de éste y grado de trabajo previo en frío), las propiedades físicas (calor específico y conductividad térmica de los metales) también influyen en el tamaño y características de la zona afectada por el calor.

La resistencia y dureza de la HAZ (figura 30.20d) dependen parcialmente de cómo se desarrollaron la resistencia y dureza originales del metal base antes de la soldadura. Como se dijo en los capítulos 2 y 4, pueden haberse desarrollado por (a) trabajo en frío; (b) reforzamiento por solución sólida; (c) endurecimiento por precipitación o (d) varios tratamientos con calor. Los efectos de estos métodos de endurecimiento son complejos; los más sencillos de analizar son los de un metal base que se ha trabajado en frío, como la laminación en frío o la forja en frío.

El calor aplicado durante la soldadura *recristaliza* los granos alargados del metal base trabajado en frío. Por un lado, los granos que están lejos del metal soldado *recristalizarán* en otros finos y equidimensionales; por otro, los granos cerca del metal soldado han estado sujetos a temperaturas elevadas durante un tiempo mayor. En consecuencia, los granos aumentarán su tamaño (*crecimiento del grano*, sección 1.7) y esta región será más suave y tendrá menos resistencia; una unión así será muy débil en su zona afectada por el calor.

Los efectos del calor en la HAZ para uniones realizadas entre metales disímboles y para aleaciones endurecidas por otros métodos son complejos y están más allá del alcance de este libro. Los detalles se pueden encontrar en las referencias más avanzadas que se citan en la bibliografía al final de este capítulo.

30.9.1 Calidad de la soldadura

Una unión soldada puede desarrollar varias **discontinuidades** como resultado de su historia de ciclos térmicos y los cambios microestructurales consecuentes. Las discontinuidades en la soldadura también son causadas por una aplicación incorrecta o descuidada de las tecnologías de la soldadura o por una mala capacitación del operador. A continuación se describen las principales discontinuidades que afectan la calidad de la soldadura:

Porosidad. La *porosidad* en las soldaduras puede ser causada por:

- Gases liberados durante la fusión del área soldada pero atrapados durante la solidificación.
- Reacciones químicas durante la soldadura.
- Contaminantes.

La mayor parte de las uniones soldadas contienen cierta porosidad, que por lo general ocurre en forma de esferas o cavidades alargadas (vea también la sección 10.6.1). La distribución de la porosidad en la zona soldada puede ser aleatoria o bien concentrarse en una región determinada del área. La porosidad en las soldaduras se puede reducir con las siguientes prácticas:

- Selección apropiada de los electrodos y metales de aporte.
- Mejores técnicas de soldadura, como el precalentamiento del área por soldar o el aumento de la tasa de entrada de calor.
- Limpieza adecuada y una manera de impedir que los contaminantes ingresen a la zona soldada.
- Velocidades reducidas de soldadura, para dar tiempo a que escape el gas.

Inclusiones de escoria. Las *inclusiones de escoria* son compuestos como óxidos, fundentes y materiales del recubrimiento de los electrodos que quedan atrapados en la zona de soldadura. Si los gases protectores no son eficaces durante el proceso de soldadura, la contaminación del ambiente contribuye también a que ocurran dichas inclusiones. Las condiciones en que se suelda también son importantes: con el control de los parámetros del proceso de soldadura la escoria fundida flotará hacia la superficie del metal fundido de la soldadura, de modo que no quedará atrapada.

Las inclusiones de escoria pueden impedirse si se implementan las prácticas siguientes:

- Limpieza de la superficie de la capa de soldadura con un cepillo de alambre (manual o eléctrico) o un cortador antes de que se deposite la capa siguiente.
- Proporcionar suficiente gas protector.
- Rediseñar la unión para permitir suficiente espacio para la manipulación apropiada del charco de metal fundido de la soldadura.

Fusión y penetración incompleta. La *fusión incompleta* produce capas de soldadura deficientes, como las que se muestran en la figura 30.21. Se puede obtener una mejor soldadura si se implementan las siguientes prácticas:

- Aumentar la temperatura del metal base.
- Limpiar el área de soldadura antes de comenzar.
- Modificar el diseño de la unión y cambiar el tipo de electrodo usado.
- Proveer suficiente gas protector.

La *penetración incompleta* ocurre cuando la profundidad de la unión soldada es insuficiente. La penetración puede mejorarse con las siguientes prácticas:

- Aumentar la entrada de calor.
- Reducir la velocidad del recorrido durante la soldadura.
- Modificar el diseño de la unión.
- Asegurarse de que las superficies por unir ajustan entre sí de manera apropiada.

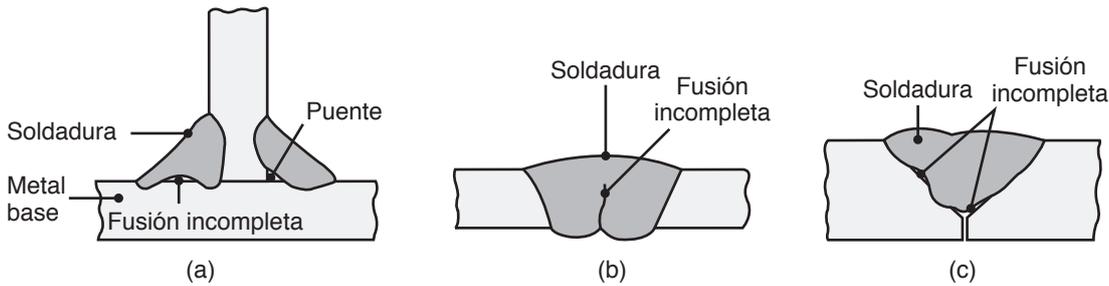


FIGURA 30.21 Ejemplos de varias discontinuidades en las soldaduras por fusión.

Perfil de la soldadura. El *perfil de la soldadura* es importante no sólo por sus efectos sobre la resistencia y aspecto de la soldadura, sino también porque puede indicar una fusión incompleta o la presencia de inclusiones de escoria en soldaduras de capas múltiples.

- El **llenado incompleto** ocurre cuando la unión no queda llena con la cantidad apropiada de metal de la soldadura (figura 30.22a).
- El **socavado** sucede por la falta de fusión del metal base y la subsecuente generación de una muesca en forma de una depresión o borde agudos (figura 30.22b). Si es profundo o agudo, el socavado actúa como un concentrador de la tensión y reduce la resistencia a la fatiga de la unión, lo que lleva a la falla prematura.
- Un **traslape** es una discontinuidad en la superficie (figura 30.22b), por lo general causada por una práctica inadecuada al soldar o por la selección inapropiada de los materiales. La figura 30.22c muestra una soldadura que se consideraría buena.

Grietas. Las *grietas* ocurren en diferentes ubicaciones y direcciones en el área de soldadura. Los tipos comunes de grietas son *longitudinales*, *transversales*, *cráter*, *bajo el cordón* y *grietas junto al cordón* (figura 30.23). Las grietas por lo general resultan por una combinación de los factores siguientes:

- Gradientes de temperatura que generan tensiones térmicas en la zona de soldadura.
- Variaciones en la composición de la zona de soldadura que causan tasas de contracción diferentes durante el enfriamiento.

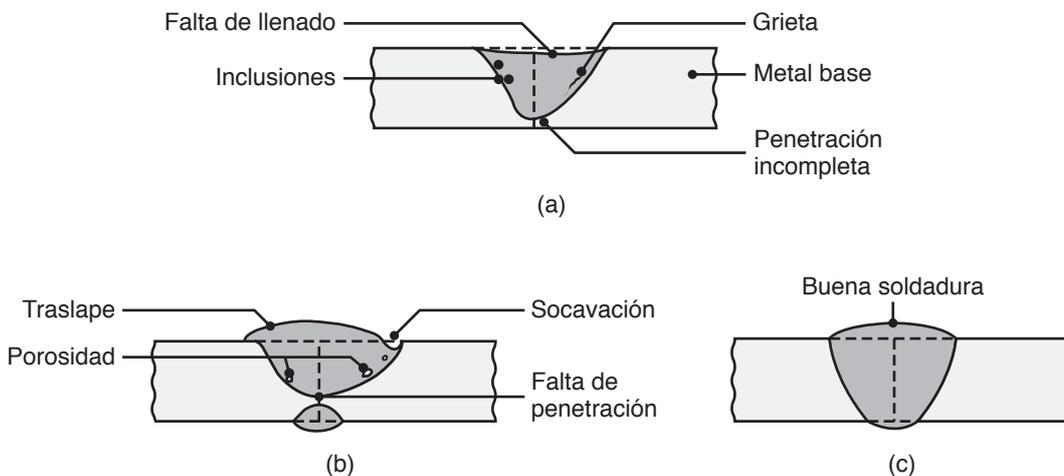


FIGURA 30.22 Ejemplos de varios defectos en soldaduras por fusión y sección transversal de una buena soldadura.

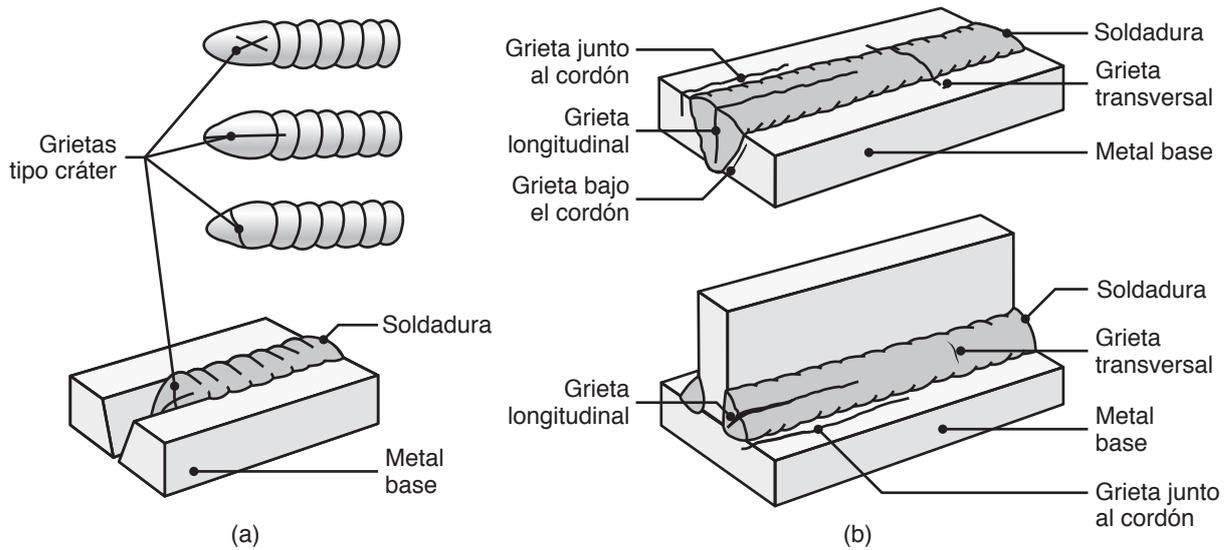


FIGURA 30.23 Tipos de grietas desarrolladas en uniones soldadas; las grietas son ocasionadas por tensiones térmicas, semejantes al desarrollo de fisuras calientes en los fundidos, como se muestra en la figura 10.12.

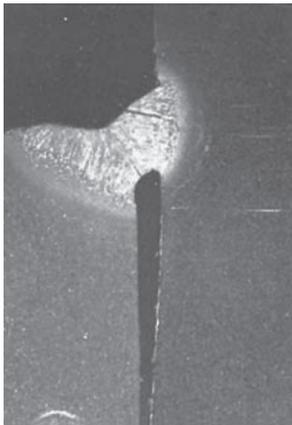


FIGURA 30.24 Grieta en un cordón de soldadura; los dos componentes soldados no se contrajeron libremente después de que se terminaron de soldar.

- Fragilidad de los límites de grano (sección 1.5.2), causada por la segregación de elementos como el azufre hacia los límites de grano y ocurre cuando la frontera sólido-líquido se desplaza a medida que el metal de la soldadura comienza a solidificarse.
- Fragilidad causada por hidrógeno (sección 2.10.2).
- Incapacidad del metal soldado para contraerse durante el enfriamiento (figura 30.24), situación parecida a las *fisuras calientes* que se desarrollan en las fundiciones (figura 10.12) y se relaciona con la tensión excesiva a que se sujeta la pieza de trabajo durante la operación de soldadura.

Las grietas también se clasifican en **calientes** (que ocurren mientras la unión todavía se encuentra sometida a temperaturas elevadas) y **frías** (que se desarrollan después de que el metal de la soldadura se ha solidificado). Las medidas básicas de prevención de grietas en la soldadura son:

- Modificar el diseño de la unión para minimizar las tensiones desarrolladas por la contracción durante el enfriamiento.
- Cambiar los parámetros, procedimientos y secuencia de la operación de soldadura.
- Precalentar los componentes que se van a soldar.
- Evitar el enfriamiento rápido de los componentes soldados.

Fisuras laminares. En la sección 1.5, al describir la anisotropía de los metales deformados plásticamente, se dijo que la pieza de trabajo es más débil cuando se prueba en dirección de su espesor debido al alineamiento de las impurezas e inclusiones no metálicas (*bandas*). Esta condición se observa en particular en placas roladas y en formas estructurales. Al soldar dichos componentes se llegan a desarrollar *fisuras laminares* debido a la contracción de los componentes tensados de la estructura durante el enfriamiento. Dichas fisuras se pueden evitar si se facilita la contracción de los miembros o si se modifica el diseño de la unión para hacer que la soldadura penetre con más profundidad en el componente más débil.

Daño en la superficie. Durante la soldadura puede salpicar algo de metal caliente y depositarse en forma de pequeñas gotas en las superficies adyacentes. En los procesos de soldadura por arco, el electrodo puede tocar en forma inadvertida las partes que

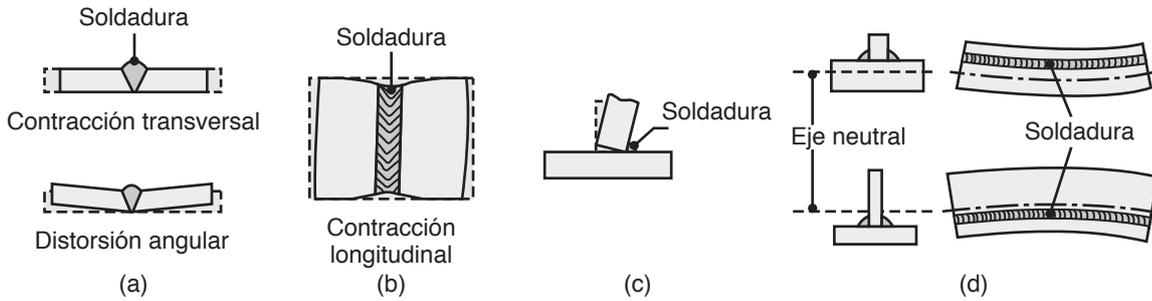


FIGURA 30.25 Distorsión de las partes después de la soldadura; la distorsión la causan la expansión y contracción térmica diferencial en las distintas regiones del ensamblaje soldado.

se sueldan en lugares distintos de la zona que se suelda; esos contactos se denominan **golpes de arco**. Las discontinuidades en la superficie producidas de esa forma son perjudiciales por razones de apariencia, uso subsecuente o ensamblaje de la estructura soldada. Si son graves, dichas discontinuidades también pueden afectar en forma adversa las propiedades de la estructura soldada, en particular para metales sensibles a la muesca. Es importante el uso de técnicas y procedimientos de soldadura adecuados con el fin de evitar daños en la superficie.

Esfuerzos residuales. Debido al calor y enfriamiento en zonas bien localizadas durante la soldadura, la expansión y contracción del área de soldadura causa *esfuerzos residuales* en la pieza de trabajo (vea también la sección 2.11). Los esfuerzos residuales provocan los siguientes defectos:

- Distorsión, alabeo y pandeo de las partes soldadas (figura 30.25).
- Agrietamiento por corrosión-esfuerzo (sección 2.10.2).
- Distorsión adicional si posteriormente se remueve una porción de la estructura soldada, por maquinado o aserrado.
- Reducción de la vida de fatiga de la estructura soldada.

El tipo y distribución de los esfuerzos residuales desarrollados en las soldaduras se describe mejor en la figura 30.26a. Cuando se sueldan dos placas queda una zona larga y estrecha sujeta a elevadas temperaturas, en tanto que las placas en su conjunto se hallan esencialmente a la temperatura ambiente. Después de que se termina la operación de soldar y conforme pasa el tiempo, el calor de la zona de soldadura se disipa en forma lateral hacia las placas y el área soldada se comienza a enfriar. Así, las placas comienzan entonces a expandirse en forma longitudinal, mientras que la longitud soldada empieza a contraerse (figura 30.25).

Si no se restringe la placa, se torcerá, como se aprecia en la figura 30.25a. Sin embargo, si la placa no tiene libertad para torcerse desarrollará esfuerzos residuales, que por lo general se distribuyen en todo el material, como los esfuerzos que se muestran en la figura 30.26b. Observe que la magnitud de los esfuerzos residuales compresivos en las placas se reduce a cero en las superficies superior e inferior de la placa soldada. Debido a que no hay fuerzas externas que actúen sobre las placas soldadas, las fuerzas de tensión y compresivas representadas por estos esfuerzos residuales deben equilibrarse entre sí.

En la figura 30.27 se muestra la secuencia de eventos que provocan la distorsión de una estructura tubular sencilla que se suelda. Antes de soldarse, la estructura está libre de esfuerzos, como se aprecia en la figura 30.27a, y es bastante rígida; también puede estar presente algún arreglo que dé apoyo a la estructura como parte de un ensamblaje mayor. Durante la soldadura el metal fundido llena el espacio entre las superficies por unir y forma una capa de soldadura. A medida que esta capa comienza a solidificarse, tanto la soldadura como el material circundante comienzan a enfriarse hasta la temperatura am-

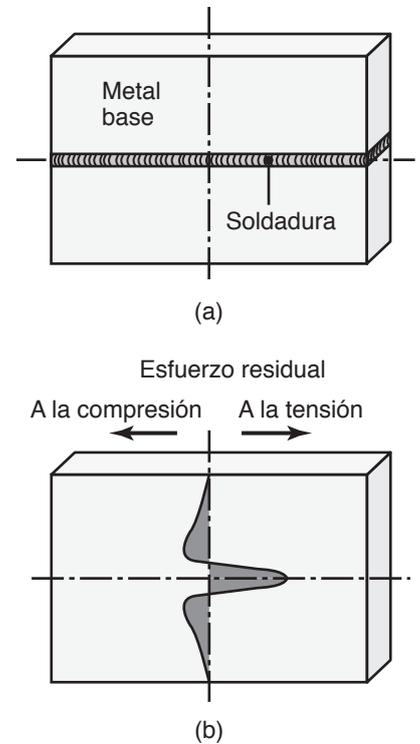


FIGURA 30.26 Esfuerzos residuales desarrolladas en una unión recta trasera; observe que los esfuerzos residuales mostrados deben balancearse internamente puesto que no hay fuerzas externas (vea también la figura 2.29).

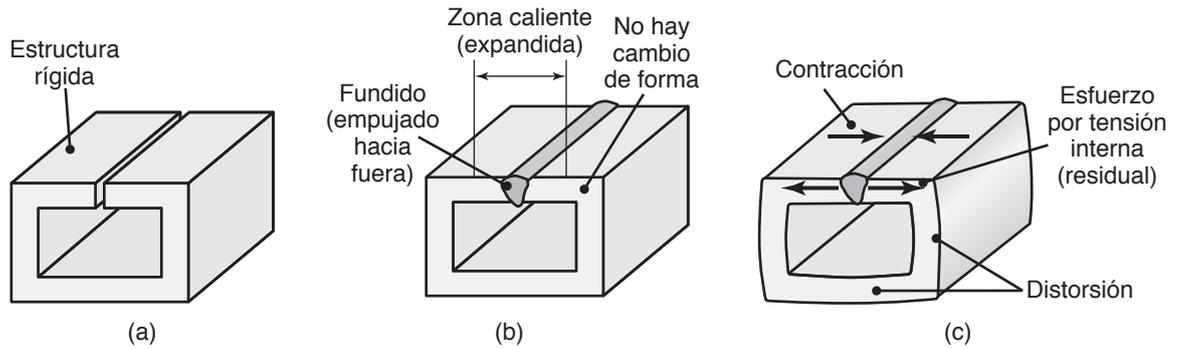


FIGURA 30.27 Distorsión de una estructura soldada. Fuente: Tomado de J. A. Schey.

biente. Conforme estos materiales se enfrían tienden a contraerse, pero son restringidos por el resto del arreglo; como resultado, las partes se distorsionan (figura 30.27c) y se desarrollan los esfuerzos residuales.

Los esfuerzos residuales producen la deformación que se muestra en la figura 30.27c y ponen la soldadura y la zona afectada por calor en un estado residual de tensión, lo que no es deseable para el desempeño con respecto a la fatiga. En general, la zona afectada por el calor es menos resistente a la fatiga que el metal base. Dado que los esfuerzos residuales desarrollados pueden ser peligrosos, es usual liberar los esfuerzos de soldaduras sujetas a elevados esfuerzos o en aplicaciones susceptibles a la fatiga (vea más adelante). Recuerde que la soldadura en sí puede tener porosidad (vea la figura 30.22b), la cual también puede actuar como un concentrador de esfuerzos y llevar al crecimiento de la fatiga por agrietamiento.

En estructuras complejas soldadas, las distribuciones de esfuerzos residuales son tridimensionales y dificultan el análisis. Note que las dos placas que se muestran en la figura 30.26 no tienen restringidos sus movimientos; en otras palabras, las placas no eran parte integral de una estructura mayor. Sin embargo, si hubieran estado restringidas se habrían desarrollado esfuerzos por reacción debido a que las placas no tienen libertad de expandirse o contraerse. Ésta es una situación que se presenta en particular en estructuras con mucha rigidez.

Relevado de esfuerzos en las soldaduras. Los problemas causados por los esfuerzos residuales, como distorsión, torceduras y agrietamientos, se pueden reducir al **precalentar** el metal base o las partes por soldar. El precalentamiento reduce la distorsión porque disminuye la velocidad de enfriamiento después de soldar y el nivel de esfuerzos térmicos desarrollados (con la reducción del módulo de elasticidad). Esta técnica también reduce la contracción y las posibles fracturas de la unión.

Para resultados óptimos, las temperaturas de precalentamiento y las velocidades de enfriamiento deben controlarse con cuidado para mantener una resistencia y dureza aceptables en las estructuras soldadas. Las piezas de trabajo pueden calentarse de varias maneras, por ejemplo (a) en un horno; (b) con electricidad (ya sea con resistencias o inductivamente) o (c) con la radiación de focos o una corriente de aire caliente, en especial para secciones delgadas. La temperatura y tiempo requeridos para relevar los esfuerzos dependen del tipo de material y de la magnitud de los esfuerzos residuales desarrollados.

Otros métodos de relevado de esfuerzos incluyen *granallado*, *martilleo* o *rolado superficial* (sección 34.2) del área del cordón de soldadura. Estas técnicas inducen esfuerzos compresivos residuales, que a su vez disminuyen o eliminan los esfuerzos por tensión residuales en la soldadura. Para soldaduras de capas múltiples no se deben golpear la primera y la última capas con el fin de protegerlas contra posibles daños por impactos en la superficie.

Los esfuerzos residuales también pueden relevarse o reducirse por medio de la deformación *plástica* de la superficie en sí en una pequeña cantidad. Por ejemplo, esta técnica se utiliza en la soldadura de ollas de vapor por medio de presurización interna (*en pruebas de esfuerzo*). Sin embargo, para reducir la posibilidad de una fractura súbita cuando hay una presión interna grande, la soldadura debe hacerse en forma apropiada y estar libre de muescas y discontinuidades, las cuales actúan como concentradores de esfuerzos.

Además de precalentarse para aliviar los esfuerzos, las soldaduras pueden ser tratadas térmicamente con varias técnicas con el fin de modificar otras propiedades. Estas técnicas incluyen recocido, normalizado, temple y revenido de aceros, inclusive el tratamiento por solubilización y envejecimiento de diferentes aleaciones, como se describe en el capítulo 4.

30.9.2 Soldabilidad

La *soldabilidad* de un metal se define en general como su capacidad de ser soldado en una estructura específica que tenga ciertas propiedades y características y que cumplirá satisfactoriamente sus requerimientos de servicio. La soldabilidad implica una gran cantidad de variables, por lo que es difícil generalizar. Recuerde que todas las características del material son importantes, como los elementos de aleación, impurezas, inclusiones, estructura del grano e historia de procesamiento, tanto del metal base como del aporte. Por ejemplo, la soldabilidad de los aceros disminuye conforme aumenta el contenido de carbono, debido a la formación de martensita (que es dura y quebradiza; sección 4.7), y por tanto reduce la resistencia del acero. Las placas de acero recubierto (capítulo 34) también presentan varias dificultades para ser soldadas, lo que depende del tipo y espesor del recubrimiento.

Debido a los efectos de la fusión y solidificación, y de los cambios microestructurales asociados, es esencial hacer una consideración completa del diagrama de fase y la respuesta del metal o aleación a las temperaturas elevadas sostenidas. También influyen en la soldabilidad las propiedades mecánicas y físicas: resistencia, tenacidad, ductilidad, sensibilidad a la muesca, módulo de elasticidad, calor específico, punto de fusión, dilatación térmica, características de la tensión superficial del metal fundido y resistencia a la corrosión.

Es importante la preparación de las *superficies* para la soldadura, al igual que la naturaleza y propiedades de las películas superficiales de óxido y los gases adsorbidos (vea también la sección 33.2). El proceso particular de soldadura que se emplee afecta significativamente las temperaturas que se desarrollan y su distribución en la zona de soldadura. Otros factores que afectan la soldabilidad son los gases de protección, los fundentes, el contenido de humedad de los recubrimientos de los electrodos, la velocidad de soldadura, la posición de ésta, la velocidad de enfriamiento y el nivel de precalentamiento, así como las técnicas posteriores a la soldadura, tales como el relevado de las tensiones y los tratamientos térmicos.

Soldabilidad de los materiales ferrosos

- *Aceros al carbono*: por lo general es excelente para aceros al bajo carbono, de regular a buena para aceros al medio carbono, y mala para aceros al alto carbono.
- *Aceros de baja aleación*: igual que para los aceros al medio carbono.
- *Aceros de alta aleación*: por lo general es buena en condiciones bien controladas.
- *Aceros inoxidable*: en general se sueldan con varios procesos.
- *Hierros fundidos o colados*: son soldables generalmente, aunque su soldabilidad varía mucho.

Soldabilidad de materiales no ferrosos

- *Aleaciones de aluminio*: soldables a una tasa elevada de entrada de calor; es importante la presencia de un gas protector inerte y la ausencia de humedad; por lo general las aleaciones de aluminio que contienen zinc o cobre se consideran no soldables.
- *Aleaciones de cobre*: en función de su composición, en general son soldables a altas tasas de entrada de calor; son importantes el uso de un gas protector y la ausencia de humedad.
- *Aleaciones de magnesio*: son soldables si se emplea un gas aislante que proteja y fundentes.
- *Aleaciones de níquel*: similar a los aceros inoxidable; no es deseable la ausencia de azufre.
- *Aleaciones de titanio*: son soldables con el uso apropiado de gases protectores.
- *Tantalio*: similar al titanio.

- *Tungsteno*: en condiciones bien controladas, es soldable.
- *Molibdeno*: similar al tungsteno.
- *Niobio (colombio)*: buena soldabilidad.

30.9.3 Prueba de las soldaduras

Como en todos los procesos de manufactura, la calidad de una unión soldada se califica por medio de su prueba. Se han establecido diversas pruebas y procedimientos estandarizados que están a disposición de las organizaciones en instituciones como la American Society for Testing and Materials (ASTM), American Welding Society (AWS), American Society of Mechanical Engineers (ASME), American Society of Civil Engineers (ASCE) y otras dependencias federales (estadounidenses).

Las uniones soldadas pueden someterse a pruebas *destruktivas* o *no destruktivas* (vea también las secciones 36.10 y 36.11). Cada técnica tiene ciertas capacidades y limitaciones, así como sensibilidad a los parámetros del proceso, confiabilidad y requerimientos de equipos especiales y habilidad del operador.

Técnicas de pruebas destruktivas

- **Ensayo de tensión.** Los *ensayos de tensión longitudinal y transversal* se llevan a cabo en especímenes extraídos de uniones soldadas reales y del área del metal soldado; después se construyen curvas de esfuerzo-deformación aplicando los procedimientos descritos en la sección 2.2. Estas curvas indican el esfuerzo de cedencia, la resistencia máxima a la tensión y la ductilidad de la unión soldada (elongación y reducción del área) en diferentes ubicaciones y direcciones.
- **Ensayo de tensión y cortante.** En el *ensayo de tensión y cortante* (figura 30.28a), los especímenes se preparan para simular las condiciones a que se sujetarían las uniones soldadas. Dichos especímenes son sometidos a tensiones de modo que puedan determinarse la resistencia cortante del metal soldado y la ubicación de la fractura.

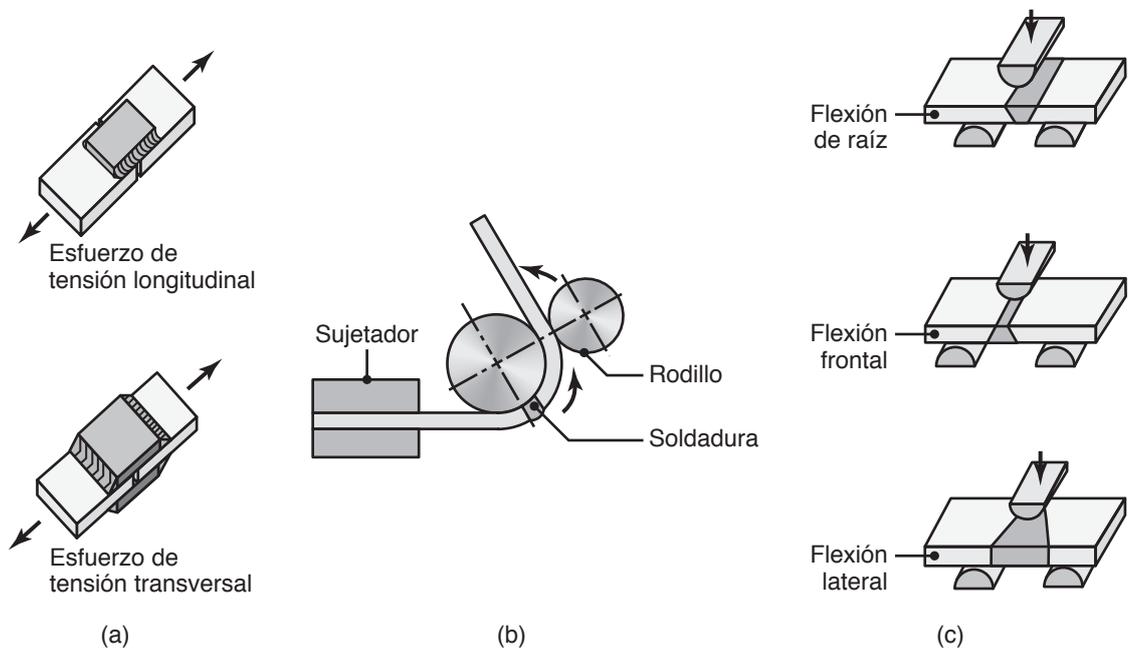


FIGURA 30.28 (a) Especímenes para el ensayo longitudinal de tensión y cortante y para el ensayo transversal de tensión y cortante. (b) Método de ensayo de flexión general. (c) Flexión transversal de tres puntos de especímenes soldados.

- **Ensayo de flexión.** Se han diseñado varias pruebas para determinar la ductilidad y resistencia de las uniones soldadas. En una que es común, el espécimen soldado se flexiona alrededor de un soporte (*prueba de dobléz*, figura 30.28b). En otra, los especímenes se prueban a la *flexión transversal en tres puntos* (figura 30.28c; vea también la figura 2.11a). Estas pruebas ayudan a determinar la ductilidad relativa y resistencia de las uniones soldadas.
- **Ensayo de resistencia a la fractura.** Las pruebas de resistencia a la fractura por lo general utilizan técnicas de prueba con impacto, descritas en la sección 2.9. Primero se preparan los especímenes *Charpy con muesca en V* y se prueba su resistencia al impacto. En la *prueba de caída de un peso*, la energía se suministra por un peso que cae.
- **Ensayos de termofluencia y corrosión.** Los *ensayos de termofluencia* (sección 2.8) son esenciales para determinar el comportamiento de uniones y estructuras soldadas sujetas a temperaturas elevadas. Las uniones soldadas también se prueban con respecto a su resistencia a la *corrosión* (sección 3.8). Debido a la diferencia en la composición y microestructura, en la zona de la soldadura puede tener lugar una *corrosión preferencial*.

Técnicas de pruebas no destructivas. Es frecuente que las estructuras soldadas tengan que probarse con métodos *no destructivos* (sección 36.10), en particular para aplicaciones críticas en las que una falla de la soldadura puede ser catastrófica, como en los recipientes a presión, miembros estructurales con carga dinámicas y plantas generadoras de energía. Por lo general las técnicas de prueba no destructiva para uniones soldadas consisten en los siguientes métodos:

- Visual.
- Radiográfico (rayos X).
- Partícula magnética.
- Líquido penetrante.
- Ultrasónica.

Como ejemplo de otro método no destructivo, las pruebas para la distribución de la dureza (vea la sección 2.6 y las figuras 16.3 y 30.20) en la zona de soldadura también serían un indicador útil de la resistencia de la soldadura y de los cambios microestructurales.

30.10 Diseño de la unión y selección del proceso

Al describir los procesos individuales de soldadura se dieron varios ejemplos acerca de los tipos de soldaduras y uniones producidas, así como de sus aplicaciones en diferentes productos de consumo e industriales. En la figura 30.29 se muestran tipos comunes de uniones producidas por soldadura, así como su terminología. En la figura 30.30 se dan los símbolos estándar que es común usar en la ingeniería para describir los tipos de soldaduras. Dichos símbolos identifican el tipo de soldadura, el diseño de la muesca, el tamaño y longitud de la soldadura, el proceso de ésta, la secuencia de las operaciones y otra información necesaria.

En la figura 30.31 se dan lineamientos generales para el diseño. En los capítulos 31 y 32 se estudian varios tipos más de diseño de la unión. A continuación se resumen algunos lineamientos importantes del diseño.

- El diseño del producto debe minimizar el número de uniones, ya que la soldadura puede consumir mucho tiempo y ser costosa, a menos que sea automatizada.
- Deben seleccionarse las ubicaciones de la soldadura de modo que se eviten los esfuerzos locales excesivos o las concentraciones de esfuerzos, así como para tener una mejor apariencia.
- Se debe seleccionar la localización de la soldadura de manera que no interfiera con ningún procesamiento subsecuente de los componentes unidos ni con el uso que se pretende darles.

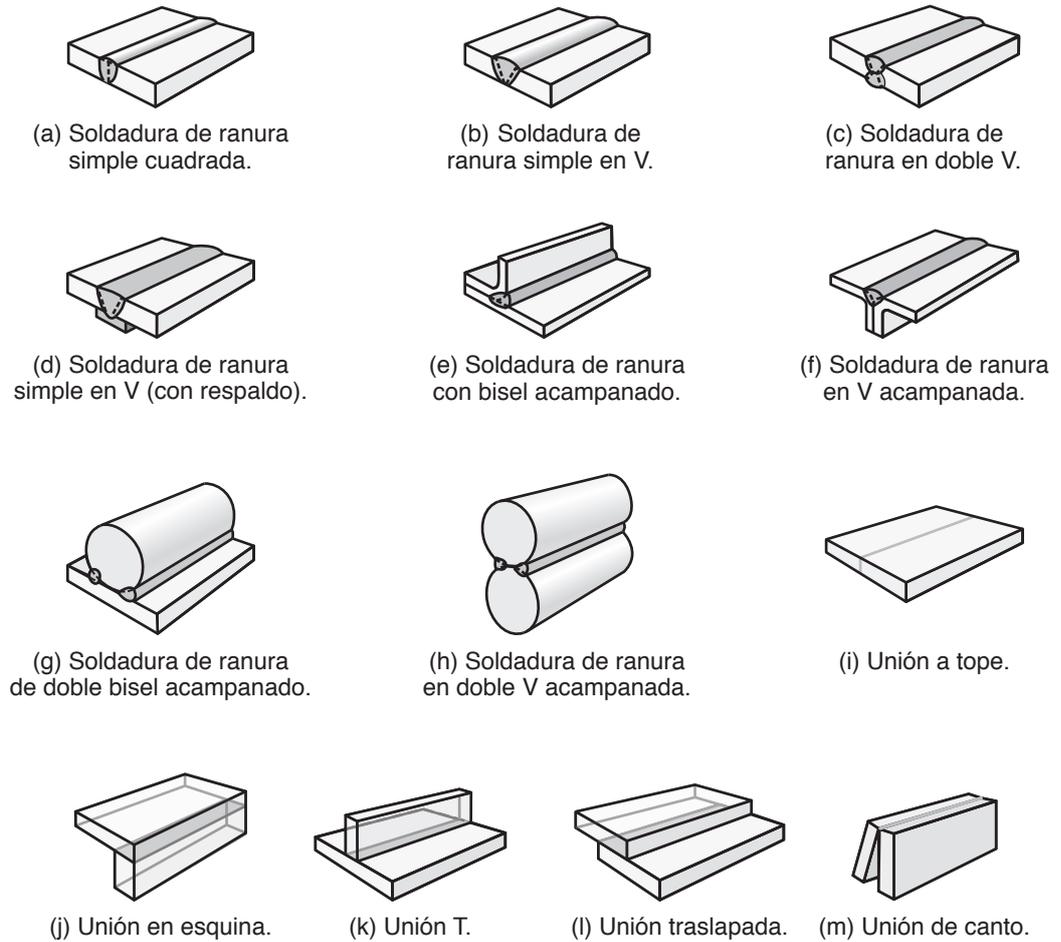


FIGURA 30.29 Ejemplos de uniones soldadas y su terminología.

- Debe minimizarse o evitarse la necesidad de preparación de la arista.
- El tamaño del cordón de soldadura debe ser lo más pequeño posible, a la vez que se mantiene la resistencia de la unión con el fin de conservar metal de soldadura y obtener un mejor aspecto.

Selección del proceso de soldadura. Además de analizar las características, capacidades y materiales de los procesos de soldaduras descritas hasta el momento en este capítulo, la selección de una unión soldada y un proceso apropiado también contempla las siguientes consideraciones (vea también los capítulos 31 y 32):

- Configuración de las partes por unir, diseño de la unión, espesor y tamaño de los componentes, así como el número de uniones que se requiere.
- Métodos usados en la manufactura de los componentes por unir.
- Tipos de materiales implicados.
- Ubicación, accesibilidad y facilidad de unión.
- Aplicación y requerimientos de servicio, como tipo de carga, cualesquiera esfuerzos generados y el ambiente.
- Efectos de distorsión, torceduras, aspecto, decoloración y servicio.
- Costos implicados en la preparación de la arista, unión y procesamiento posterior (inclusive operaciones de maquinado, rectificado y acabado).
- Costos de equipo, materiales, mano de obra y habilidades requeridas, además del costo de la operación en su totalidad.

Símbolos básicos de soldadura por arco y gas							Símbolos básicos de soldadura por resistencia				
Canto	Chaflán	Tapón o ranura	Ranura				De un punto	Proyección	Costura	A tope con presión	
			Cuadrada	V	Bisel	U					J

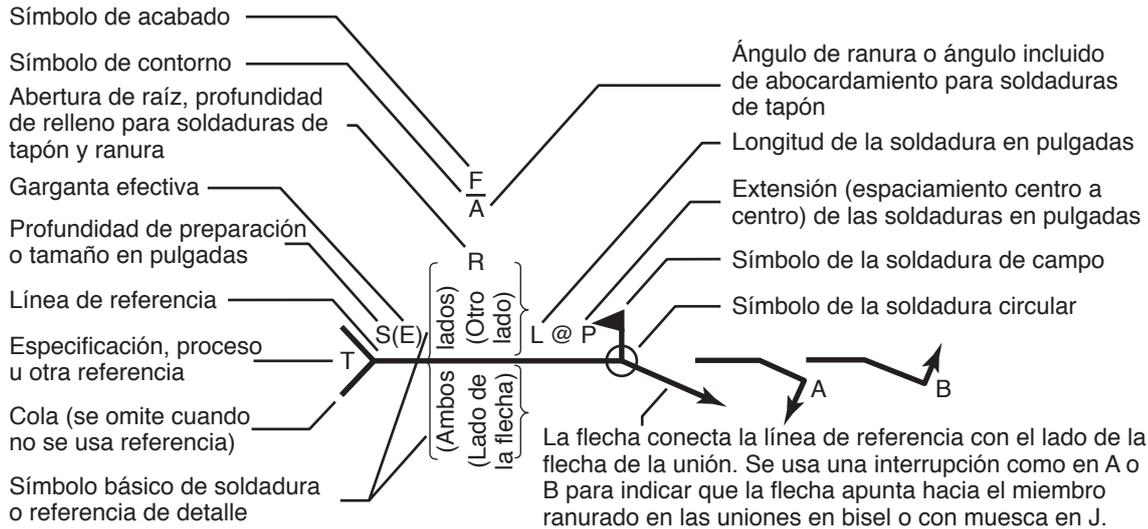


FIGURA 30.30 Identificación y símbolos estándar para las soldaduras.

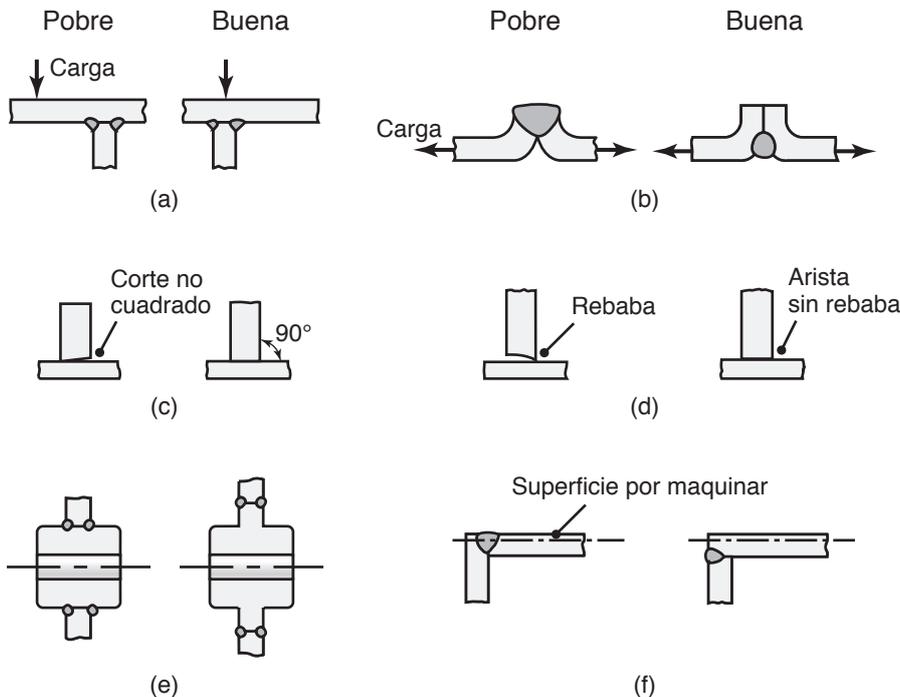


FIGURA 30.31 Algunos lineamientos de diseño para soldaduras. Fuente: Bralla, J. G., *Design for Manufacturability Handbook*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1999, ISBN núm. 0-07-07139-X.

EJEMPLO 30.3 Selección del diseño de la soldadura

En la figura 30.32 se muestran tres tipos diferentes de diseños de soldadura. Las dos uniones verticales en la figura 30.32a se pueden soldar externa o internamente. Observe que la soldadura externa en toda su longitud tomará un tiempo considerable y requerirá más material soldado que el diseño alternativo, el cual consiste en soldaduras internas intermitentes. Además, en el método alternativo mejora el aspecto de la estructura y se reduce la distorsión.

En la figura 30.32b, se observa que el diseño de la derecha puede soportar tres veces el momento M que el diseño de la izquierda. Observe también que ambos diseños requieren la misma cantidad de metal de soldadura y de tiempo. En la figura 30.32c, la soldadura de la izquierda requiere alrededor de dos veces la cantidad de material de soldadura que el diseño de la derecha. Además, debido a que debe maquinarse más material, el diseño de la izquierda requerirá más tiempo de preparación de la arista y se desperdiciará más metal base.

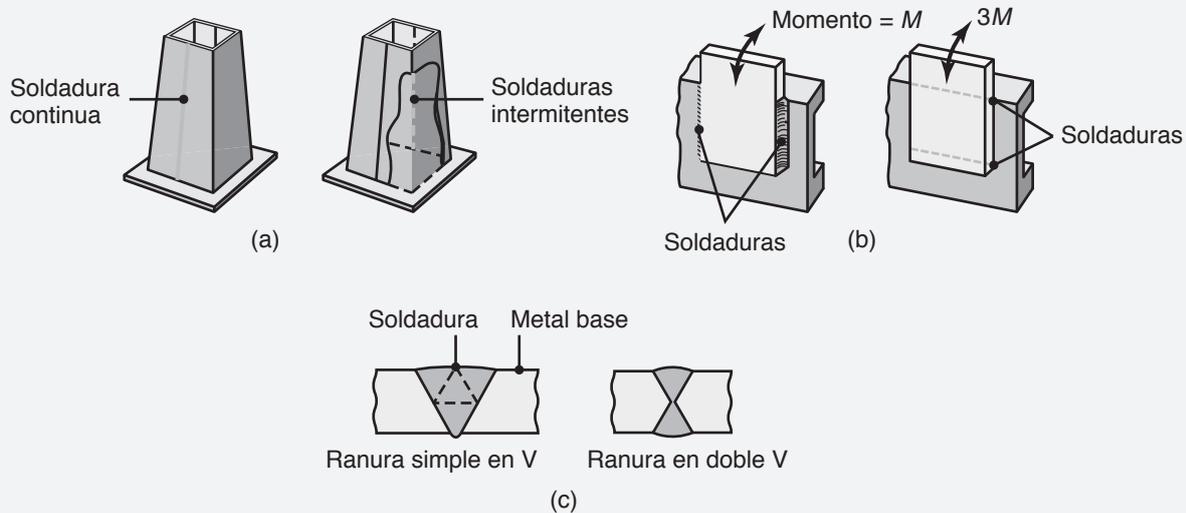


FIGURA 30.32 Ilustraciones de los diseños de soldaduras que se describen en el ejemplo 30.3.

RESUMEN

- Las soldaduras con gas oxcombustible, por arco y haz de alta energía, están entre las operaciones más comunes utilizadas para unir. La soldadura con gas usa energía química; y para suministrar el calor necesario en la soldadura por arco y con haz de alta energía se utiliza energía eléctrica.
- En todos los procesos descritos se emplea calor para que la unión por soldar pase a un estado líquido. Se usan gases protectores para evitar la oxidación del charco de soldadura fundida y del área de la soldadura. En la soldadura con gas oxcombustible y por arco, pueden usarse o no metales de aporte.
- La selección de un proceso de soldadura para una operación en particular depende del material de la pieza de trabajo, de su espesor y tamaño, de la complejidad de su forma, del tipo de unión que se requiere, de la resistencia necesaria y del cambio que causará la soldadura en el aspecto del producto.
- Se dispone de una amplia variedad de equipo para soldar, gran parte del cual ahora está controlado por computadora y robótica con herramientas programables.
- También pueden cortarse metales por los procesos basados en gas oxcombustible y por arco. El corte de aceros tiene lugar principalmente por oxidación (quemado) del material. Las temperaturas más altas para cortar se obtienen con arco de plasma.

- La unión soldada consiste en metal solidificado y una zona afectada por el calor; cada una tiene una variación amplia en su microestructura y propiedades, lo que depende de los metales unidos y de los metales de aporte. La metalurgia de la unión soldada es un aspecto importante de todos los procesos de soldadura ya que determina la resistencia, tenacidad y calidad de la unión.
- En la zona de soldadura pueden desarrollarse discontinuidades como porosidad, inclusiones, soldaduras incompletas, fisuras, daño en la superficie y grietas. Los esfuerzos residuales y su relevado son consideraciones importantes.
- La soldabilidad de los metales y aleaciones depende en gran medida de su composición, propiedades mecánicas y físicas, tipo de operación de soldadura y parámetros del proceso que se emplea, así como del control de los parámetros de la soldadura.
- Existen lineamientos generales para la selección de métodos apropiados y económicos para una aplicación en particular de la soldadura.

TÉRMINOS CLAVE

Abertura o ranura de corte (kerf)	Flama oxidante Flama reductora	Soldadura con electroescoria Soldadura con electrogas	Soldadura por arco de electrodo revestido
Corte con gas oxicom bustible	Fundente	Soldadura con gas oxicom bustible	Soldadura por arco de gas metálico
Corte por arco	Inclusiones	Soldadura con haz de electrones	Soldadura por arco de gas tungsteno
Discontinuidades	Líneas de arrastre	Soldadura con hidrógeno atómico	Soldadura por arco sumergido
Electrodo	Metal base	Soldadura con láser SMAW	Soldadura por fusión
Electrodo consumible	Metal de aporte	Soldadura con rayo láser	Técnica de ojo de cerradura
Electrodo no consumible	Metal de la soldadura	Soldadura con varillas	Unión
Electrodo revestido	Perfil de la soldadura	Soldadura por arco	Zona afectada por el calor
Escoria	Pistola de soldar	Soldadura por arco con núcleo fundente	
Esfuerzos residuales	Polaridad		
Fisuras	Porosidad		
Flama carburizante	Soldabilidad		
Flama neutral	Soldadura con arco de plasma		

BIBLIOGRAFÍA

- ASM *Handbook*, Vol. 6: *Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International, 1993.
- ASM *Handbook*, Vol. 6A: *Welding Fundamentals and Processes*, ASM International, 2011.
- Cary, H. B. y Helzer, S., *Modern Welding Technology*, 6a. ed., Prentice Hall, 2004.
- Davies, A. C., *The Science and Practice of Welding*, 10a. ed. (2 vols.), Cambridge University Press, 1993.
- Duley, W. W., *Laser Welding*, Wiley, 1998.
- Houldcroft, P. T., *Welding and Cutting: A Guide to Fusion Welding and Associated Cutting Processes*, Industrial Press, 2001.
- Kou, S., *Welding Metallurgy*, 2a. ed., Wiley-Interscience, 2002.
- Steen, W. M. y Mazumder, J., *Laser Material Processing*, 4a. ed., Springer, 2010.
- Welding Handbook*, 9a. ed. (3 vols.), American Welding Society, 2007.
- Welding Inspection Handbook*, American Welding Society, 2000.
- Weman, K., *Welding Processes Handbook*, CRC Press, 2003.

PREGUNTAS DE REPASO

- 30.1** Describa la fusión en cuanto a su relación con las operaciones de soldado.
- 30.2** Explique las características de las flamas neutra, reductora y oxidante. ¿Por qué recibe su nombre la flama reductora?
- 30.3** ¿Qué es la soldadura con varillas?
- 30.4** Explique los principios básicos de los procesos de la soldadura por arco.
- 30.5** ¿Por qué la soldadura por arco de electrodo revestido es un proceso de uso común?
- 30.6** ¿Qué es lo que protege a un cordón de soldadura sobre una superficie de acero contra la oxidación (herrumbre) durante la soldadura?
- 30.7** Describa las funciones y características de los electrodos. ¿Qué funciones tienen los recubrimientos? ¿Cómo se clasifican los electrodos?
- 30.8** ¿Cuáles son las semejanzas y diferencias entre los electrodos consumibles y los no consumibles?

- 30.9** ¿Qué propiedades son útiles para una protección con gas?
- 30.10** ¿Cuáles son las ventajas de la soldadura por termita?
- 30.11** Explique de dónde se obtiene la energía para la soldadura por termita.
- 30.12** Diga cómo tiene lugar el corte cuando se usa un soplete de gas oxicomcombustible. ¿Cómo se realiza el corte bajo el agua?
- 30.13** ¿Cuál es el propósito del fundente? ¿Por qué no se necesita en la soldadura por arco de gas tungsteno?
- 30.14** ¿Qué significa calidad de la soldadura? Analice los factores que influyen en ella.

- 30.15** ¿Cómo se define la soldabilidad?
- 30.16** ¿Por qué los electrodos para soldar suelen estar recubiertos?
- 30.17** Describa los tipos comunes de discontinuidades que se presentan en las uniones soldadas.
- 30.18** ¿Qué tipos de pruebas destructivas se realizan para las uniones soldadas?
- 30.19** Explique por qué la soldadura con hidrógeno puede usarse para soldar tungsteno sin que se funda el electrodo de tungsteno.
- 30.20** ¿Qué materiales se pueden soldar con la soldadura híbrida de láser SMAW?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 30.21** Explique las razones de por qué, con los años, se han desarrollado tantos procesos de soldadura.
- 30.22** Se ha observado que la transferencia de calor es más elevada en la soldadura por arco de gas metálico que en la soldadura por arco de electrodo revestido. Explique por qué es así. ¿Qué procesos llevarían a tener más grietas en la zona afectada por el calor en los aceros endurecidos?
- 30.23** Explique por qué algunas uniones tienen que precalentarse antes de soldarlas.
- 30.24** Describa el rol de los metales de aporte en la soldadura.
- 30.25** Enuncie los procesos que se pueden ejecutar con dos electrodos. ¿Cuáles son las ventajas de usar dos electrodos?
- 30.26** ¿Cuál es el efecto de la conductividad térmica de la pieza de trabajo sobre el ancho de la abertura de corte (kerf) al cortar con gas oxicomcombustible? Explique.
- 30.27** Describa las diferencias entre el corte con gas oxicomcombustible de las aleaciones ferrosas y no ferrosas. ¿Qué propiedades son significativas?
- 30.28** ¿Podría usarse el corte con gas oxicomcombustible para una pila de placas metálicas? (*Nota:* Para el corte de una pila, vea la figura 24.25e). Explique.
- 30.29** ¿Cuáles son las ventajas de la soldadura con haz de electrones y con rayo láser en comparación con la soldadura por arco?
- 30.30** Describa con qué métodos pueden evitarse las discontinuidades en la soldadura.
- 30.31** Explique el significado de la rigidez de los componentes por soldar, tanto en la calidad de la soldadura como en la forma de la parte.
- 30.32** Comente los factores que influyen en el tamaño de las dos capas soldadas que se aprecian en la figura 30.15.
- 30.33** ¿Cuáles de los procesos descritos en este capítulo no son portátiles? ¿Podrían hacerse portátiles? Explique.

- 30.34** Es común usar la soldadura por termita para soldar rieles de ferrocarril. Enumere las razones que la hacen atractiva para esta aplicación. Revise su lista y mencione los productos que serían apropiados para aplicarles la soldadura por termita e identifique cualesquier dificultad que esperaría encontrar al utilizarla en cada aplicación.
- 30.35** Describa las observaciones que usted tenga con respecto al contenido de la tabla 30.1.
- 30.36** ¿Qué es lo que determina si cierto proceso de soldadura puede usarse para piezas de trabajo en posiciones horizontal, vertical o lateral —o, a ese respecto, en cualquier posición—? (Vea la tabla 30.1). Explique y aporte ejemplos de aplicaciones apropiadas.
- 30.37** Comente los factores implicados en la selección de los electrodos en los procesos de la soldadura con arco.
- 30.38** En la tabla 30.1, la columna sobre la distorsión de componentes soldados está ordenada de la menor a la mayor. Explique por qué varía el grado de distorsión entre los diferentes procesos de soldadura.
- 30.39** Explique el significado de los esfuerzos residuales en las estructuras soldadas.
- 30.40** Ordene los procesos descritos en este capítulo en términos de (a) costo y (b) calidad de la soldadura.
- 30.41** ¿El metal de aporte debe estar hecho con la misma composición que el metal base que se va a soldar? Explique.
- 30.42** ¿Qué son las salpicaduras de soldadura? ¿Cuáles son sus fuentes? ¿Cómo pueden controlarse? Explique.
- 30.43** Describa sus observaciones acerca de la figura 30.20.
- 30.44** Si se precalientan los materiales por soldar, ¿es probable que aumente o disminuya la porosidad? Explique.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

- 30.45** Haga una gráfica de la dureza que se ilustra en la figura 30.20d como función de la distancia desde la superficie superior y exponga sus observaciones.
- 30.46** Tendrá lugar una operación de soldadura en acero al carbono. La velocidad de soldadura deseada es de alrededor de 0.8 pulg/s. Si se usa un suministro de energía para soldadura por arco, con voltaje de 12 V, ¿qué corriente se necesita si el ancho de la soldadura ha de ser de 0.2 pulg?

- 30.47** En la figura 30.26b, suponga que la mayor parte de la porción superior de la pieza de arriba se corta en forma horizontal con una sierra afilada. Entonces las tensiones residuales se alterarán y la parte cambiará su forma, como se describe en la sección 2.11. Para este caso, ¿cómo piensa usted que se distorsionará: curvada hacia abajo o hacia arriba? Explique (vea también la figura 2.30d).

30.48 En una placa de aleación de aluminio se realiza una operación de soldadura. Un tubo de 2.5 pulg de diámetro, con espesor de pared de 0.20 pulg y 2 pulg de longitud, está soldado a tope sobre un ángulo de hierro de 6 pulg \times 6 pulg \times 0.25 pulg de espesor. El ángulo de hierro tiene una sección transversal en L y longitud de 1 pie. Si la zona soldada con un proceso de arco de gas tungsteno tiene un ancho aproximado de 0.5 pulg, ¿cuál sería el incremento de temperatura de toda la estructura debido a que el calor solamente entra por la soldadura? ¿Qué pasaría si el proceso fuera una operación de soldadura con haz de electrones y un ancho de capa de 0.08 pulg? Suponga que para fundir un gramo el electrodo requiere 1500 J y la aleación de aluminio requiere 1200 J.

30.49 Se realiza una operación de soldadura en acero al carbono. La velocidad deseada es de alrededor de 1 pulg/s. Si el suministro de energía es de 10 V, ¿qué corriente se necesita si el ancho de la soldadura ha de ser de 0.25 pulg?

30.50 En el corte con oxiacetileno, arco y rayo láser, los procesos involucran básicamente el fundido de la pieza de trabajo. Si se ha de cortar un agujero con diámetro de 800 mm en una placa de 250 mm de diámetro y 12 mm de espesor, grafique el aumento de la temperatura media en el material como función del ancho del corte. Suponga que la mitad de la energía pasa al material.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

30.51 Comente acerca del tamaño de la pieza de trabajo y las limitaciones de su forma para cada uno de los procesos descritos en este capítulo.

30.52 La deflexión del arco es un fenómeno donde el campo magnético inducido por la corriente de soldadura pasa a través del electrodo y la pieza de trabajo en un proceso de arco de electrodo, interactúa con el arco y ocasiona salpicaduras graves de la soldadura. Identifique las variables que piense que son importantes en dicha deflexión. Cuando la deflexión fuera un problema, ¿usted recomendaría que se minimizara usando energía de CA o CD?

30.53 Revise los tipos de uniones soldadas que se ilustran en la figura 30.29 y dé una aplicación para cada una.

30.54 Comente sobre los lineamientos de diseño expuestos en las diferentes secciones de este capítulo.

30.55 Se le pide que inspeccione una estructura soldada para una aplicación crítica de ingeniería. Describa el procedimiento que seguiría para determinar la seguridad de la estructura.

30.56 Analice la necesidad y el rol de los accesorios para sujetar el trabajo en las operaciones de soldadura descritas en este capítulo.

30.57 Haga una lista de los procesos de soldadura que sean apropiados para producir (a) uniones a tope, en las que la soldadura tenga forma recta o segmento de recta; (b) puntos de soldadura y (c) tanto uniones rectas como puntos de soldadura. Comente sus observaciones.

30.58 Explique los factores que contribuyen a las diferencias en las propiedades a través de una unión soldada.

30.59 Explique por qué es eficaz el precalentamiento de los componentes por soldar para reducir la probabilidad de que se presenten grietas.

30.60 Revise los diseños defectuosos y buenos que se presentan en la figura 30.31 y explique las razones de calificarlos así.

30.61 En la construcción de grandes barcos hay necesidad de soldar secciones gruesas y grandes de acero para formar el casco. Considere cada una de las operaciones estudiadas en este capítulo y enuncie los beneficios y desventajas de cada operación particular para hacer las uniones en esta aplicación.

30.62 Inspeccione las diferentes partes y componentes de (a) un automóvil; (b) un aparato grande y (c) utensilios de cocina y explique cuáles, si los hay, de los procesos descritos en este capítulo se han utilizado para unirlos.

30.63 Comente si hay factores comunes que afecten la soldabilidad, susceptibilidad de fundirse, facilidad de formado y maquinabilidad de los metales, según se describe en varios capítulos de este libro. Explique con ejemplos apropiados.

30.64 Si durante una inspección usted encontrara un defecto en una unión soldada, ¿cómo haría para determinar si es importante o no?

30.65 Los mástiles de las grúas se construyen con secciones transversales extruidas (vea la figura 15.2) que se sueldan juntas. Cualquier torcedura que cause que un tramo se desvíe de la posición rectilínea reduciría gravemente su capacidad de carga. Haga una investigación bibliográfica acerca de los métodos utilizados para minimizar la distorsión debida a la soldadura y cómo corregirla, en específico durante la construcción de mástiles para grúa.

30.66 Una práctica común al reparar partes costosas que se han roto o desgastado (como ocurre cuando se rompe un fragmento de una pieza forjada) es llenar el área con capas de soldadura y luego maquinar la parte hasta sus dimensiones originales. Haga una lista de las precauciones que usted le sugeriría a alguien que usara este método.

30.67 Considere una unión a tope que ha de soldarse. Dibuje la forma soldada que esperaría obtener con (a) SMAW; (b) soldadura con rayo láser y (c) soldadura híbrida con rayo láser SMAW. Indique el tamaño y forma de la zona afectada por el calor que se esperaría. Haga comentarios sobre sus observaciones.

30.68 Haga un bosquejo de los lineamientos generales acerca de la seguridad en las operaciones de soldadura descritas en este capítulo. Prepare para cada operación un cartel que proporcione instrucciones eficaces y concisas con respecto a las prácticas al soldar (o cortar). Revise las distintas publicaciones del National Safety Council y de otras organizaciones similares.

Procesos de soldadura de estado sólido

- 31.1 Introducción 912
- 31.2 Soldadura en frío y unión por rolado 913
- 31.3 Soldadura ultrasónica 914
- 31.4 Soldadura por fricción 915
- 31.5 Soldadura con resistencia 917
- 31.6 Soldadura por explosión 925
- 31.7 Soldadura por difusión 926
- 31.8 Economía de las operaciones de soldadura 928

EJEMPLOS:

- 31.1 Unión por rolado de la moneda estadounidense de 25 centavos 913
- 31.2 Calor generado en la soldadura por puntos 920
- 31.3 Soldadura con resistencia *versus* soldadura con rayo láser en la manufactura de latas 924
- 31.4 Aplicaciones de la soldadura por difusión 927

CASO DE ESTUDIO:

- 31.1 Soldadura de pistones por fricción 929

- Este capítulo describe una familia de procesos para unir en los que las piezas de trabajo no pasan por un cambio de fase, y si se usa calor éste es generado internamente.
- El capítulo comienza con el análisis de la soldadura en frío, seguida por la soldadura ultrasónica y las diferentes formas de procesos de soldadura por fricción.
- Después se describe la soldadura por resistencia, seguida por la soldadura por explosión y la soldadura por difusión; estos tres procesos tienen capacidades y aplicaciones únicas apropiadas para una amplia variedad de materiales y se pueden automatizar para la producción a gran escala.
- En el capítulo también se estudian las capacidades especiales de los procesos de unión y de soldadura por difusión, que se combinan con el formado superplástico.
- Por último, se analizan las consideraciones económicas de la soldadura.

31.1 Introducción

Este capítulo describe los procesos de la **soldadura de estado sólido**, en los que la unión tiene lugar sin fusión en la interfase de las dos partes que se van a soldar. A diferencia de los procesos de soldadura por fusión descritos en el capítulo 30, en la soldadura de estado sólido no se requiere una fase líquida o derretida para hacer la unión. El principio de la soldadura de estado sólido se demuestra mejor con el ejemplo siguiente: si dos superficies limpias se ponen en contacto estrecho una con otra a presión suficiente, se adhieren y producen una unión. Para que el enlace sea fuerte, es esencial que la interfase esté libre de contaminantes como películas de óxido, residuos, fluidos de trabajo de metales, e incluso capas de gas adsorbidas.

La unión de estado sólido implica uno o más de los parámetros siguientes:

- **Calor:** al aplicar calor externo se incrementa la *difusión* (la transferencia de átomos a través de una interfase) y mejora la resistencia de la soldadura entre las dos superficies unidas, como ocurre en la *soldadura por difusión*. El calor se puede generar (a) internamente por fricción (como se utiliza en la soldadura por fricción), (b) por medio de resistencia eléctrica (como en los procesos de *soldadura con resistencia eléctrica*, como la *soldadura por puntos*) y (c) externamente por inducción (como en los tubos de la *soldadura a tope*).
- **Presión:** cuanto mayor sea la presión, más fuerte será la interfase resultante (como en la *unión por rolado* y en la *soldadura por explosión*), donde también hay deformación plástica. La presión y el calor pueden combinarse, como en la *soldadura a tope por presión*, la *soldadura de presión* y la *soldadura por proyección de resistencia*.
- **Movimientos interfaciales relativos:** cuando ocurre (como en la soldadura ultrasónica) un movimiento relativo (deslizamiento) de las superficies de contacto (llama-

das superficies de empalme), incluso pequeñas amplitudes alterarán la interfase, romperán cualesquier película de óxido presente y generarán nuevas superficies limpias, con lo que mejora la resistencia de la soldadura.

Actualmente, la mayoría de los procesos están automatizados por la robótica, sistemas de visión, sensores y controles adaptativos y de computadora (los cuales se describen en la parte VIII) para propósitos de reducción de costo, consistencia de la operación, confiabilidad de la calidad de la soldadura y mayor productividad. Los costos involucrados en el proceso de unión se bosquejan en la sección 31.8.

31.2 Soldadura en frío y unión por rolado

En la *soldadura en frío* (CW, por sus siglas en inglés), se aplica presión a las piezas de trabajo por medio de dados o rodillos. Debido a la *deformación plástica* involucrada, es necesario que al menos una (pero de preferencia ambas) de las partes complementarias sean suficientemente dúctiles. Por lo general la soldadura en frío se realiza con metales no ferrosos o en hierro blando con poco o ningún contenido de carbono. Antes de soldar se desgrasa la interfase, se cepilla con alambre y se limpia para eliminar manchas de óxido. Algunas aplicaciones incluyen productos hechos de alambre y conexiones eléctricas.

Durante la unión de dos metales diferentes que sean mutuamente solubles, pueden formarse compuestos *intermetálicos* frágiles (sección 4.2.2), los cuales producirían una unión débil y quebradiza; un ejemplo de esto es la unión de aluminio con acero. La adhesión más resistente se obtiene con dos materiales semejantes.

Unión por rolado. La presión requerida para soldar se puede aplicar por medio de un par de rodillos (figura 31.1), proceso llamado *unión por rolado* o *soldadura por rolado* (ROW, por sus siglas en inglés). Desarrollada en la década de 1960, la unión por rolado se usa para manufacturar algunas de las monedas de Estados Unidos (vea el ejemplo 31.1). Es importante la preparación de la superficie para lograr una buena resistencia interfaseal. La operación también puede llevarse a cabo a temperaturas elevadas (*unión por rolado en caliente*).

Ejemplos comunes de este proceso son el *chapado* de (a) aluminio puro sobre una hoja de aleación de aluminio endurecida por precipitación (Alclad, nombre comercial), para obtener una superficie resistente a la corrosión con un núcleo interno fuerte, de uso común en la industria aeroespacial, (b) acero inoxidable sobre acero blando, para tener resistencia a la corrosión, y (c) cobre sobre acero, para cables coaxiales. Una aplicación común de la unión por rolado es la producción de *tiras bimetalicas* para termostatos y controles similares, que usan dos capas de materiales con distintos coeficientes de dilatación térmica (vea la tabla 3.1). La adhesión en sólo determinadas regiones seleccionadas en la interfase puede lograrse por medio de la deposición de un agente separador, como grafito o cerámica, llamado *interruptor* (vea la sección 31.7).

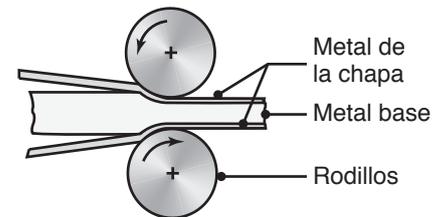


FIGURA 31.1 Ilustración esquemática de la unión por el proceso de rolado, o chapado.

EJEMPLO 31.1 Unión por rolado de la moneda estadounidense de 25 centavos

La técnica usada para manufacturar las monedas compuestas de 25 centavos de Estados Unidos es la unión por rolado de dos capas externas de 75% Cu y 25% Ni (cuproníquel), donde cada capa tiene un espesor de 1.2 mm (0.048 pulg), con una capa interna de cobre puro de 5.1 mm (0.20 pulg) de espesor. Para obtener una buena resistencia en la unión, las superficies a empalmar se limpian químicamente y se cepillan con alambre. Primero se rolan las tiras hasta un espesor de 2.29 mm (0.09 pulg); una segunda operación de rolado reduce el es-

pesor a 1.36 mm (0.0535 pulg). Así, las tiras experimentan una reducción total de 82% de su espesor.

Debido a la deformación plástica, hay un aumento importante del área superficial entre las capas, lo que causa la generación de superficies interfaseales limpias. Esta extensión del área de la superficie sujeta a la gran presión aplicada por los rodillos, combinada con la solubilidad sólida del níquel y el cobre (vea la sección 4.2.1), produce una fuerte adhesión entre las capas de metal.

31.3 Soldadura ultrasónica

En la *soldadura ultrasónica* (USW, por sus siglas en inglés), las superficies a empalmar de los dos componentes se someten a una fuerza normal y esfuerzos cortantes (tangenciales) oscilantes. Los esfuerzos cortantes se aplican con la punta de un **transductor** (figura 31.2a), el cual es parecido al que se usa en el maquinado ultrasónico (vea la figura 26.26a). Por lo general la frecuencia de oscilación está en el rango de 10 a 75 kHz, aunque se puede emplear una frecuencia menor o mayor. Para una operación eficiente, es importante tener un acoplamiento apropiado entre el transductor y la punta (llamada **sonotrodo**, de las palabras *sonido* y *electrodo*; también llamado *cuerno*).

Las tensiones cortantes causan deformación plástica en la interfase de los dos componentes, lo que rompe las películas de óxido y contaminantes, y así se obtiene un buen contacto y se produce una unión fuerte de estado sólido. La temperatura generada en la zona soldada suele ser de la tercera parte a la mitad del punto de fusión (en la escala absoluta de temperatura) de los metales unidos; en consecuencia, no tienen lugar ni el derretimiento ni la fusión. Sin embargo, en determinadas situaciones la temperatura generada es suficientemente elevada como para causar cambios metalúrgicos en la zona de la soldadura, lo que afecta la resistencia de la unión.

El proceso de soldadura ultrasónica es versátil y confiable, por lo que puede usarse con una amplia variedad de materiales metálicos y no metálicos, inclusive metales disímiles (como en las tiras bimetálicas). Se usa mucho para unir plásticos (vea la sección 32.6), para empacar con papel metálico y en las industrias automotriz y electrónica de consumo para la soldadura traslapada de lámina, papel metálico (foil) y alambre delgado. El extremo soldador se puede reemplazar con *discos rotatorios* (figura 31.2b) para la soldadura de costura de estructuras en las que uno de los componentes es lámina, papel metálico o algún material con tejido de polímero (proceso semejante a la *soldadura de costura por resistencia*, sección 31.5.2).

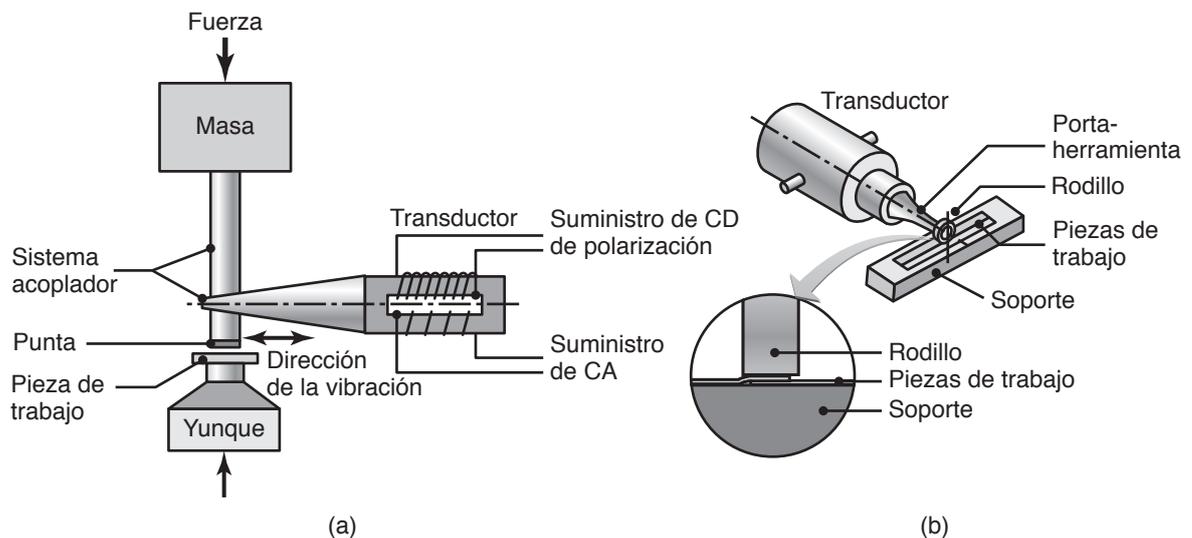


FIGURA 31.2 (a) Componentes de una máquina de soldadura ultrasónica para hacer soldaduras traslapadas; las vibraciones laterales de la punta de la herramienta causan deformación plástica y la unión de la interfase de las piezas de trabajo. (b) Soldadura de costura ultrasónica, con el uso de un rodillo como *sonotrodo*.

31.4 Soldadura por fricción

En los procesos de unión descritos hasta este momento, la energía requerida para la soldadura es suministrada por fuentes externas, generalmente es energía química, eléctrica o ultrasónica. En la *soldadura por fricción* (FRW, por sus siglas en inglés), el calor requerido para soldar se genera por fricción en la interfase de los dos componentes por unir.

La soldadura por fricción se desarrolló en la década de 1940, en ella una de las piezas de trabajo permanece estacionaria mientras que la otra se coloca en un plato de sujeción o boquilla y gira a una velocidad periférica constante de hasta 15 m/s (3000 pies/min). Después, los dos miembros a unir se ponen en contacto sometidos a una fuerza axial (figura 31.3). Luego de que se ha establecido suficiente contacto, el miembro rotatorio se detiene rápidamente (de modo que la soldadura no se destruya por cizallamiento) mientras que la fuerza axial se incrementa. Los óxidos y otros contaminantes presentes en la interfase son expelidos por el movimiento radial hacia fuera del metal caliente en la interfase.

La presión en la interfase y el calor resultante de la fricción son suficientes para que se forme una unión fuerte. La zona de la soldadura por lo general está confinada a una región estrecha y su tamaño y forma dependen de (a) la cantidad de calor generado; (b) la conductividad térmica de los materiales; (c) las propiedades mecánicas de los materiales a unir a elevadas temperaturas; (d) la velocidad rotacional y (e) la presión axial que se aplique (figura 31.4). Estos factores deben controlarse para obtener una unión fuerte y uniforme.

La soldadura por fricción puede usarse para unir una amplia variedad de materiales, siempre que uno de los componentes tenga alguna simetría rotacional. Las partes sólidas o tubulares se pueden soldar con buena resistencia de la unión. Barras de acero sólido de hasta 100 mm (4 pulg) de diámetro y tubos de hasta 250 mm (10 pulg) de diámetro exterior se han soldado con éxito por fricción. Debido a la combinación de calor y presión, la interfase en la soldadura por fricción desarrolla una *rebaba* por deformación plástica (recalcado) de la zona calentada. Esta rebaba (si fuera cuestionable) se puede eli-

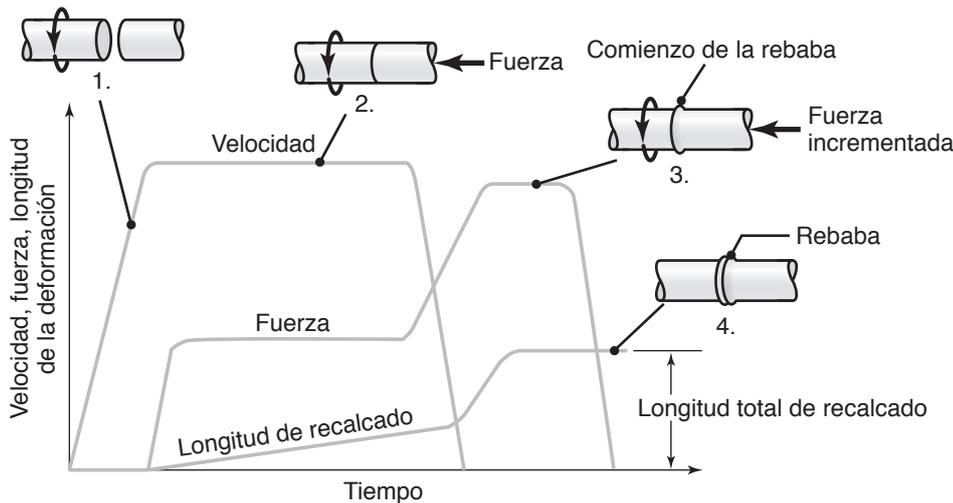


FIGURA 31.3 Secuencia de operaciones en el proceso de soldadura por fricción: (1) la parte de la izquierda gira a gran velocidad. (2) La parte de la derecha se pone en contacto con la de la izquierda bajo una fuerza axial. (3) La fuerza axial se incrementa y la parte de la izquierda detiene su rotación; se comienza a formar una rebaba. (4) Después de que se ha logrado una longitud especificada de deformación, se completa la soldadura. La *longitud de recalcado* es la distancia que las dos piezas se mueven hacia dentro durante la soldadura después de haber tenido su contacto inicial; así, la longitud total después de soldar es menor que la suma de las longitudes de las dos piezas. La rebaba se puede eliminar posteriormente por medio de maquinado o esmerilado.

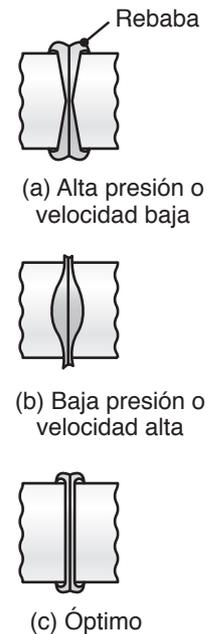


FIGURA 31.4 Forma de las zonas de fusión en la soldadura por fricción como función de la fuerza axial aplicada y la velocidad rotacional.

minar fácilmente por medio de maquinado o esmerilado. Las máquinas soldadoras por fricción están automatizadas por completo y la habilidad que se requiere del operador es mínima, una vez que los tiempos del ciclo individual para la operación completa se establezcan adecuadamente.



Código QR 31.1 Demostración de la soldadura por fricción de inercia. [Fuente: Cortesía de Manufacturing Technology, Inc. (MTI)].

Soldadura por fricción de inercia. Este proceso es una modificación de la soldadura por fricción, aunque los dos términos se han utilizado de manera indistinta. En la *soldadura por fricción de inercia*, la energía requerida para el calentamiento por fricción es suministrada por un volante. Primero se acelera el volante a la velocidad apropiada, los dos miembros se ponen en contacto y se aplica una fuerza axial. Como la fricción en la interfase empieza a disminuir la velocidad del volante, la fuerza axial se incrementa; la soldadura se termina cuando el volante se detiene. Es importante el tiempo de esta secuencia para obtener una buena calidad de la soldadura.

La masa rotatoria en las máquinas de soldadura por fricción de inercia puede ajustarse para aplicaciones que requieran diferentes niveles de energía, donde los niveles dependen del tamaño de la pieza de trabajo y sus propiedades. En una aplicación de este proceso, ejes de 10 mm (0.4 pulg) de diámetro se soldaron a impulsores de turbocargadores automotrices a razón de una unión cada 15 segundos.



Código QR 31.2 Demostración de la soldadura por fricción lineal. [Fuente: Cortesía de Manufacturing Technology, Inc. (MTI)].

Soldadura por fricción lineal. En un desarrollo adicional de la soldadura por fricción, se sujeta la interfase de los dos componentes a unir a un *movimiento recíproco lineal*, como opuesto a un movimiento rotatorio. Así, en la *soldadura por fricción lineal* los componentes no deben tener una sección transversal circular o tubular. En esta operación, una parte se mueve a través de la cara de la otra parte por medio de un mecanismo recíproco balanceado. El proceso es capaz de soldar componentes cuadrados o rectangulares, así como partes circulares, hechas de metales o plásticos.

En una aplicación de este proceso se soldó por fricción una parte rectangular de aleación de titanio a una frecuencia lineal de 25 Hz con amplitud de ± 2 mm (0.08 pulg) y con una presión de 100 MPa (15 000 psi) sobre una interfase de 240 mm² (0.38 pulg²). Se han soldado con éxito otras partes metálicas con secciones transversales rectangulares de hasta 50 mm \times 20 mm (2 pulg \times 0.8 pulg).

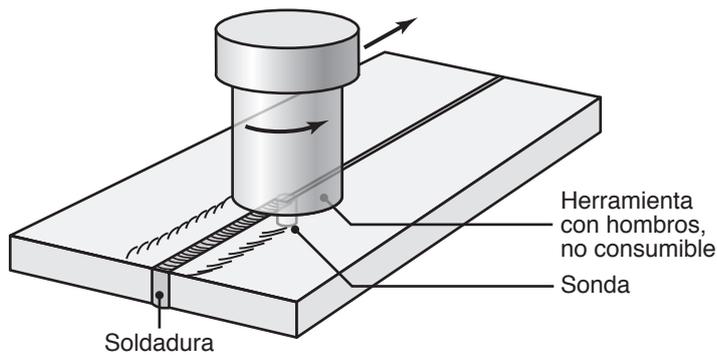


Código QR 31.3 Demostración de la soldadura por fricción de agitación. [Fuente: Cortesía de Manufacturing Technology, Inc. (MTI)].

Soldadura por fricción de agitación. En el proceso de *soldadura por fricción de agitación* (FSW, por sus siglas en inglés), desarrollado en 1991, se introduce un tercer cuerpo (llamado *sonda*) a la unión y se frota contra las dos superficies por unir. La sonda giratoria es no consumible; por lo general está hecha de nitruro de boro cúbico (sección 8.2.3) y mide de 5 a 6 mm de diámetro y 5 mm de altura (figura 31.5). La presión de contacto genera calor por fricción y la temperatura se eleva entre 230 y 260 °C (450 a 500 °F). La punta de la sonda rotatoria fuerza el mezclado o agitación del material en la unión. No se requiere gas protector ni limpieza de la superficie.

El espesor del material soldado puede ser tan pequeño como 1 mm y tan grande como 50 mm (2 pulg), se suelda en un solo paso. Se han soldado con éxito aluminio, magnesio, níquel, cobre, acero, acero inoxidable y titanio, y están en curso desarrollos para extender las aplicaciones de la FSW también a polímeros y materiales compósitos. El proceso de FSW comienza a aplicarse en la industria aeroespacial, automotriz, naviera y de vehículos militares utilizando láminas o placas. Con los desarrollos en el diseño de herramientas rotatorias, otras posibles aplicaciones incluyen la inducción de cambios microestructurales, la refinación del grano de los materiales y la mejora localizada de la tenacidad en las fundiciones.

El equipo de soldadura puede ser una fresadora convencional de husillo vertical (vea la figura 24.15b) y el proceso es relativamente fácil de implementar. Para aplicaciones especiales también existe maquinaria especial para la soldadura por fricción de agitación (figura 31.5b). Las soldaduras producidas con FSW tienen gran calidad, mínima porosidad y estructura uniforme del material. Debido a que las soldaduras se producen con poca entrada de calor, hay poca distorsión y los cambios microestructurales son menores.



(a)



(b)

FIGURA 31.5 Proceso de soldadura por fricción de agitación. (a) Ilustración esquemática de soldadura por fricción de agitación; con este proceso se han soldado placas de aleación de aluminio de hasta 75 mm (3 pulg) de espesor. (b) Máquina de ejes múltiples para soldadura por fricción de agitación para piezas grandes, como alas de aviones y estructuras del fuselaje, que puede desarrollar 67 kN (15 000 lb) de fuerzas axiales; la mueve un motor de husillo de 15 kW (20 hp) y alcanza velocidades de soldadura de hasta 1.8 m/s. Fuente: (b) Cortesía de Manufacturing Technology, Inc.

31.5 Soldadura con resistencia

La categoría de *soldadura con resistencia* (RW, por sus siglas en inglés) cubre cierto número de procesos en los cuales el calor requerido para soldar se produce por medio de una *resistencia eléctrica* a través de los dos componentes que se van a unir. Estos procesos tienen grandes ventajas, como soldaduras de alta calidad que no requieren electrodos consumibles, gases protectores o fundentes, y que pueden producirse con rapidez. La soldadura por resistencia se adapta muy bien a la automatización y se aplica con frecuencia con el empleo de robots soldadores (vea la sección 37.6).

El calor generado en la soldadura con resistencia está dado por la expresión general

$$H = I^2 R t, \quad (31.1)$$

donde

- H = Calor generado, en joules (watts-segundos)
- I = Corriente (en amperes)
- R = Resistencia (en ohms)
- t = Tiempo de flujo de la corriente (en segundos)

Con frecuencia se modifica la ecuación (31.1) de modo que represente la energía calorífica real disponible en la soldadura al incluir un factor K , el cual compensa las pérdidas de energía por conducción y radiación. Entonces, la ecuación se vuelve:

$$H = I^2 R t K, \quad (31.2)$$

donde se puede observar que el valor de K es menor que la unidad.

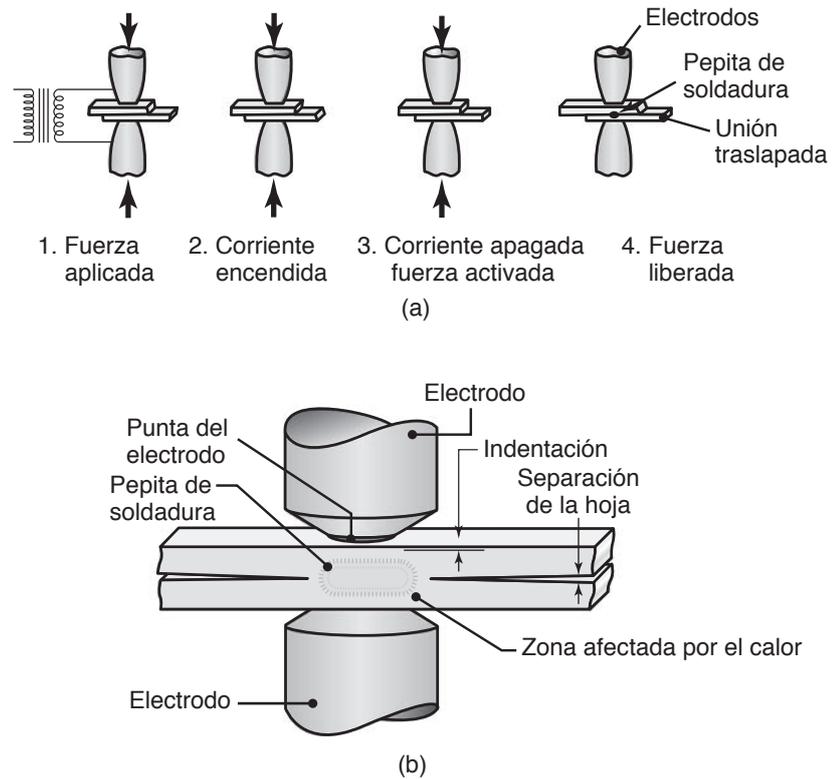


FIGURA 31.6 (a) Secuencia de eventos en la soldadura de puntos con resistencia de una unión traslapada. (b) Sección transversal de una soldadura de un punto, en la que se aprecia la pepita de soldadura y la indentación del electrodo sobre las superficies de la hoja. Éste es uno de los procesos más comúnmente usados en la fabricación de lámina metálica y en el ensamble de carrocerías de automóvil.

La *resistencia total* es la suma de lo siguiente (vea la figura 31.6):

1. Resistencias de los electrodos.
2. Resistencia del contacto entre el electrodo y la pieza de trabajo.
3. Resistencias de las partes individuales a soldar.
4. Resistencia del contacto entre las dos piezas de trabajo a unir (superficies empalmadas).

El aumento real de la temperatura en la unión depende del calor específico y de la conductividad térmica de los metales a unir. Por ejemplo, metales como el aluminio y el cobre tienen una alta conductividad térmica (vea la tabla 3.1), por lo que requieren grandes concentraciones de calor. Pueden unirse con soldadura por resistencia metales semejantes o disímboles. La magnitud de la corriente en las operaciones de soldadura con resistencia puede ser de hasta 100 000 A, pero es común que el voltaje sea de sólo 0.5 a 10 V. Lo resistente que sea la unión depende de la rugosidad de la superficie y de la limpieza de las superficies por unir. Por consiguiente, antes de soldar deben eliminarse las películas de aceite, pintura y capas gruesas de óxido, aunque no es crítica la presencia de capas uniformes y *delgadas* de óxido y otros contaminantes.

Los procesos de soldadura por resistencia se desarrollaron a principios de la década de 1900, requieren maquinaria especializada, gran parte de la cual ahora es operada por medio de controles programables de computadora. Por lo general, la maquinaria no es portátil y el proceso es adecuado sobre todo para usarlo en plantas de manufactura y talleres mecánicos. La habilidad que requiere el operador es mínima, en particular con la maquinaria moderna.

31.5.1 Soldadura de puntos por resistencia

En la *soldadura de puntos por resistencia* (RSW, por sus siglas en inglés), las puntas de dos electrodos cilíndricos, sólidos y opuestos, tocan una unión traslapada de dos metales sólidos y el calentamiento de la resistencia produce una soldadura de un punto (figura 31.6a). Con el fin de obtener una adhesión fuerte en la **parte soldada**, se aplica presión hasta que se interrumpe la corriente y la soldadura haya solidificado. En la soldadura por resistencia son esenciales el control exacto y los tiempos de la corriente alterna (CA) y de la presión. Por ejemplo, en la industria automotriz el número de ciclos varía a alrededor de 30 con una frecuencia de 60 Hz (vea también *soldadura por resistencia de alta frecuencia*, en la sección 31.5.3).

Las superficies de una soldadura de puntos tienen indentaciones ligeramente decoloradas. La parte soldada (figura 31.6b) puede medir hasta 10 mm (0.375 pulg) de diámetro. Las corrientes varían de 3000 a 40 000 A, el nivel de la corriente depende de los materiales que se han de soldar y de su espesor; por ejemplo, es común que la corriente sea de 10 000 A para los aceros y de 13 000 A para el aluminio. Los electrodos por lo general están hechos de aleaciones de cobre y deben tener suficiente conductividad eléctrica y resistir el calor para que mantengan su forma.

El proceso de soldadura por resistencia más simple y común, la soldadura de puntos, se puede ejecutar por medio de un solo electrodo (lo más común) o con pares múltiples de electrodos (hasta cien o más); la presión requerida se suministra por medios mecánicos o neumáticos. Las máquinas soldadoras de puntos, punteadoras, que normalmente se utilizan para las partes pequeñas son del **tipo balancín**, o **de brazo oscilante**; las máquinas **tipo prensa** se usan para piezas de trabajo más grandes. La forma y condición de la punta del electrodo, así como la accesibilidad del sitio son factores importantes en la soldadura de puntos. Para áreas que son difíciles de alcanzar se emplean diversas formas de electrodos (figura 31.7).

La soldadura de puntos se usa mucho para fabricar partes de lámina metálica; los ejemplos van desde fijar manijas para sujetar cacerolas de acero inoxidable (figura 31.8a) hasta soldar mofles (figura 31.8b) y grandes estructuras metálicas. El equipo moderno para soldadura de puntos es controlado por computadora, para el control óptimo del

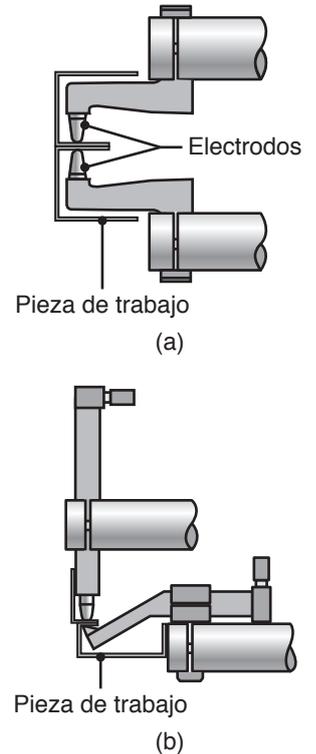


FIGURA 31.7 Dos diseños de electrodos para tener un fácil acceso a los componentes a soldar.

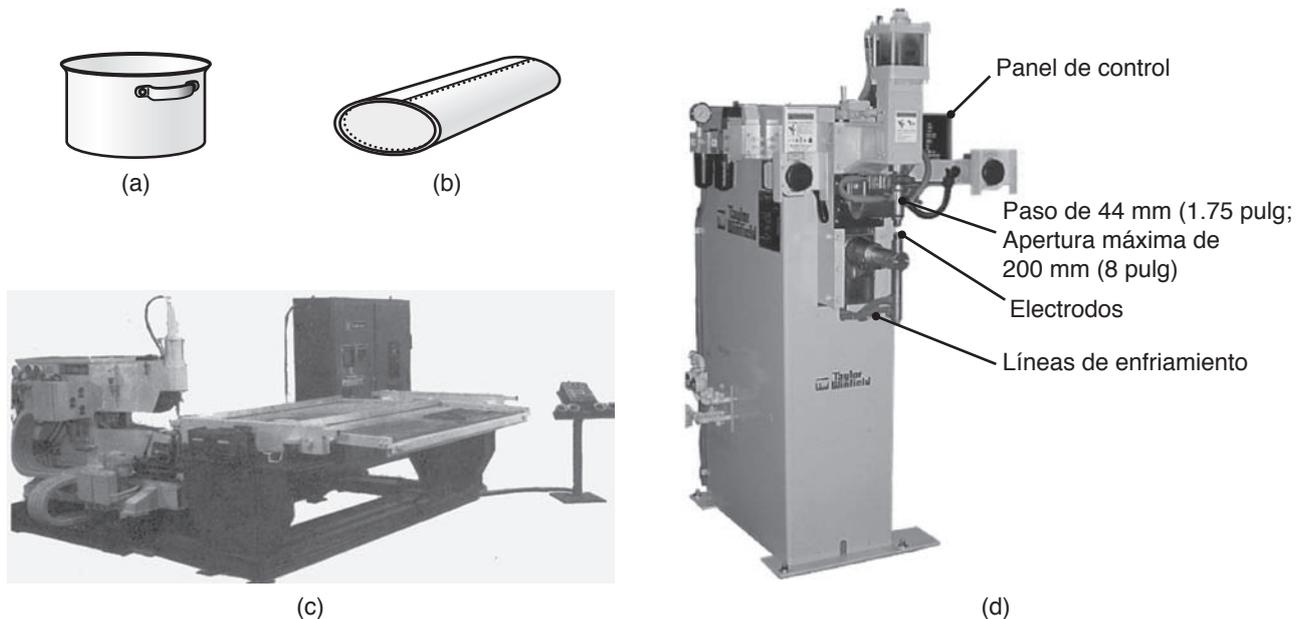


FIGURA 31.8 Piezas unidas con soldadura de puntos, (a) cacerola y (b) mofle. (c) Máquina grande y automatizada para soldadura de puntos. La punta de soldadura se mueve en tres direcciones principales; en esta máquina se pueden trabajar placas grandes de 2.2 m × 0.55 m (88 pulg × 22 pulg), con soportes adecuados para la pieza de trabajo. (d) Máquina para soldadura de puntos. Fuente: (c) y (d) Cortesía de Taylor Winfield Technologies, Inc.

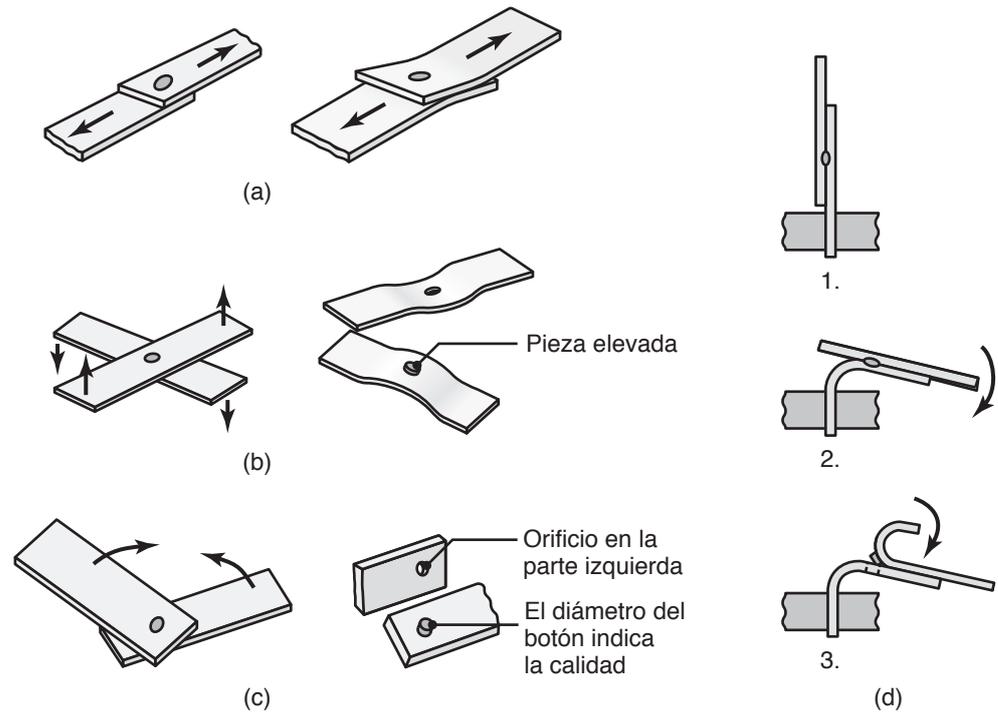


FIGURA 31.9 Métodos de prueba para soldaduras de puntos: (a) ensayo de tensión cortante; (b) ensayo de tensión transversal; (c) ensayo de torsión y (d) ensayo de desprendimiento o pelado (vea también la figura 32.9).

tiempo de la corriente y la presión, y las pistolas para soldadura de puntos las operan robots programables. Las carrocerías de automóvil pueden tener hasta 10 000 soldaduras de punto; se sueldan a grandes velocidades utilizando electrodos múltiples (vea la figura I.9 en la introducción general).

Ensayos de las soldaduras de puntos. Las uniones soldadas por puntos se pueden probar con respecto a la resistencia de la parte soldada por medio de las técnicas siguientes (figura 31.9):

- Tensión cortante.
- Tensión transversal.
- Torsión.
- Desprendimiento.

Debido a que estas técnicas son fáciles de ejecutar y no son caras, es común usar el ensayo de tensión cortante en las fábricas. Los ensayos de tensión transversal y torsión son capaces de revelar defectos, grietas y porosidad en el área soldada. El ensayo de desprendimiento se utiliza comúnmente para láminas delgadas; después de que la unión ha sido soldada y desprendida, se evalúa la forma y tamaño de la pieza soldada extraída.

EJEMPLO 31.2 Calor generado en la soldadura por puntos

Dado: Suponga que dos hojas de acero de 1 mm (0.04 pulg) de espesor están unidas con soldadura de puntos, con una corriente de 5000 A y un tiempo de flujo de corriente de 0.1 s por medio de electrodos de 5 mm (0.2 pulg) de diámetro.

Se solicita: Estimar el calor generado y su distribución en la zona de soldadura si la resistencia efectiva en la operación es de $200 \mu\Omega$.

Respuesta: De acuerdo con la ecuación (31.1),

$$\text{Calor} = (5000)^2(0.0002)(0.1) = 500 \text{ J.}$$

De la información dada, el volumen de la parte soldada se puede estimar en 30 mm^3 (0.0018 pulg^3). Suponga que la densidad del acero (tabla 3.1) es de 8000 kg/m^3 ; entonces, la parte soldada tiene una masa

de 0.24 g . El calor requerido para fundir 1 g de acero es de alrededor de 1400 J , de modo que el calor necesario para fundir la parte soldada es de $(1400)(0.24) = 336 \text{ J}$. El calor restante (164 J) se disipa en el metal que circunda la parte.

31.5.2 Soldadura por resistencia de costura

La *soldadura por resistencia de costura* (RSEW, por sus siglas en inglés) es una modificación de la soldadura de puntos en la que los electrodos son reemplazados por ruedas o rodillos giratorios (figura 31.10a). Con un suministro continuo de CA, los rodillos conductores de electricidad producen una soldadura puntual dondequiera que la corriente alcance un nivel suficientemente alto en el ciclo de CA. La velocidad común de soldadura es de 1.5 m/min (60 pulg/min) para láminas delgadas.

Con una frecuencia suficientemente alta o una velocidad transversal lenta, estas soldaduras puntuales en realidad se traslapan en una costura continua y producen una unión que es líquida y gaseosa (figura 31.10b). El proceso de RSEW se usa para hacer la costura longitudinal de latas de acero (para productos domésticos), mofles y tanques de gasolina.

En la *soldadura de puntos con rodillo*, la corriente hacia los rodillos se aplica de manera intermitente, lo que resulta en una serie de soldaduras puntuales que ocurren a intervalos especificados a lo largo de la longitud de la costura (figura 31.10c). En la *soldadura por trituración de costura* (figura 31.10d), las soldaduras que se traslapan miden alrededor de una o dos veces el espesor de la placa, y el de la costura soldada es de sólo cerca de 90% del espesor de la placa original. Este proceso también se usa para producir *piezas (formatos) de lámina metálica soldadas a la medida*, que también se pueden elaborar con soldadura de rayo láser (vea la sección 16.2.2).

31.5.3 Soldadura por resistencia de alta frecuencia

La *soldadura por resistencia de alta frecuencia* (HFRW, por sus siglas en inglés) es semejante a la soldadura de costura, excepto que se emplea una corriente de alta frecuencia de hasta 450 kHz . Una aplicación común es la producción de tubos *soldados a tope*, donde la corriente es conducida a través de dos contactos deslizantes (figura 31.11a) a los bordes de tubos formados por rolado. Después se presionan los bordes calentados por medio de pasar el tubo a través de un par de rodillos de presión; si se formara una rebaba, se recorta posteriormente.

Las secciones estructurales, como las vigas I, se fabrican con HFRW por medio de la soldadura de las almas y pestañas hechas de piezas largas y planas. Con esta técnica

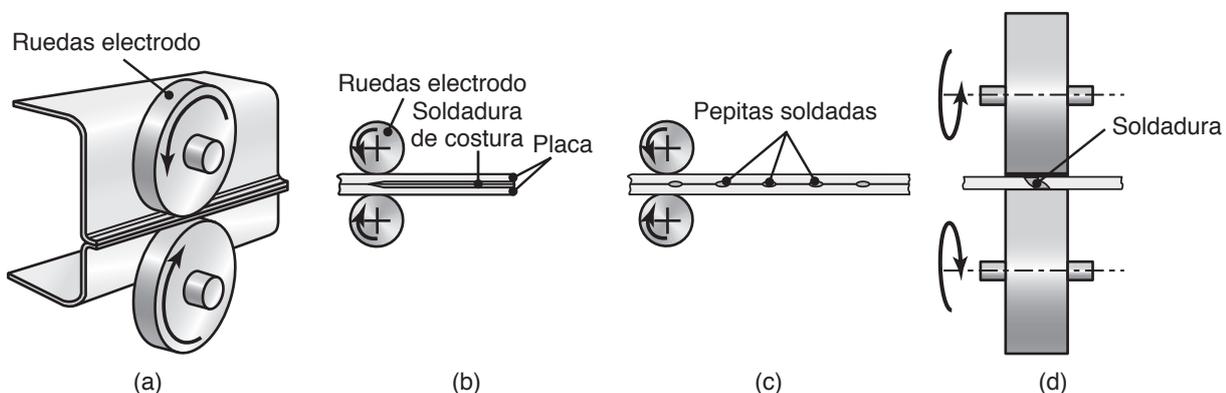


FIGURA 31.10 (a) Proceso de soldadura de costura en el cual los rodillos giratorios actúan como electrodos; (b) puntos que se traslapan en una soldadura de costura; (c) soldaduras de puntos por rolado y (d) soldadura por trituración de costura.

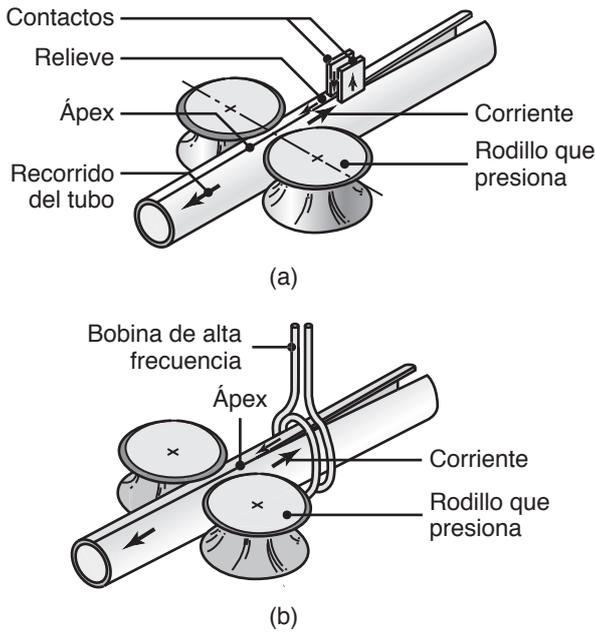


FIGURA 31.11 Dos métodos de soldar a tope dos tubos mediante alta frecuencia continua.

también pueden elaborarse tubos espirales, tubos con bordes para intercambiadores de calor y rines para llantas. En otro método, llamado **soldadura de alta frecuencia por inducción** (HFIW, por sus siglas en inglés), el tubo formado por rolado se somete a un calentamiento por inducción de alta frecuencia, como se ilustra en la figura 31.11b.

31.5.4 Soldadura por resistencia de proyección

En la *soldadura por resistencia de proyección* (RPW, por sus siglas en inglés), se desarrollan grandes resistencias eléctricas en la unión al embonar una o más proyecciones (*relieves*; vea la figura 16.39) en una de las superficies a soldar (figura 31.12). Las proyecciones pueden ser redondas u ovaladas para fines de diseño o resistencia. Se generan grandes temperaturas localizadas en las proyecciones, las cuales están en contacto con la parte plana con que se unirán. Por lo común los electrodos son de aleaciones base cobre, largos y planos, y se enfrían con agua para mantener baja su temperatura. Las partes soldadas son similares a las de la soldadura de puntos y se forman conforme los electrodos ejercen presión para ablandar, comprimir y aplanar las proyecciones.

El equipo de soldadura de puntos se puede usar para soldar por resistencia de proyección mediante modificaciones de los electrodos. Aunque el embonado de las piezas de trabajo eleva el costo de producción, la operación produce varias soldaduras en un paso y extiende la vida del electrodo; más aún, es capaz de soldar metales de diferentes espesores, como una lámina soldada sobre una placa. Con este proceso también pueden soldarse tuercas y pernos a láminas y placas (figuras 31.12c y d), con proyecciones que se producen ya sea por maquinado o forjado. La unión de una red de barras y alambres [como la que forman las canastas de metal, parrillas (figura 31.12e), parrillas de hornos y carritos de supermercado] se considera soldadura por resistencia de proyección debido a las muchas áreas pequeñas de contacto entre los alambres que se cruzan (mallas).

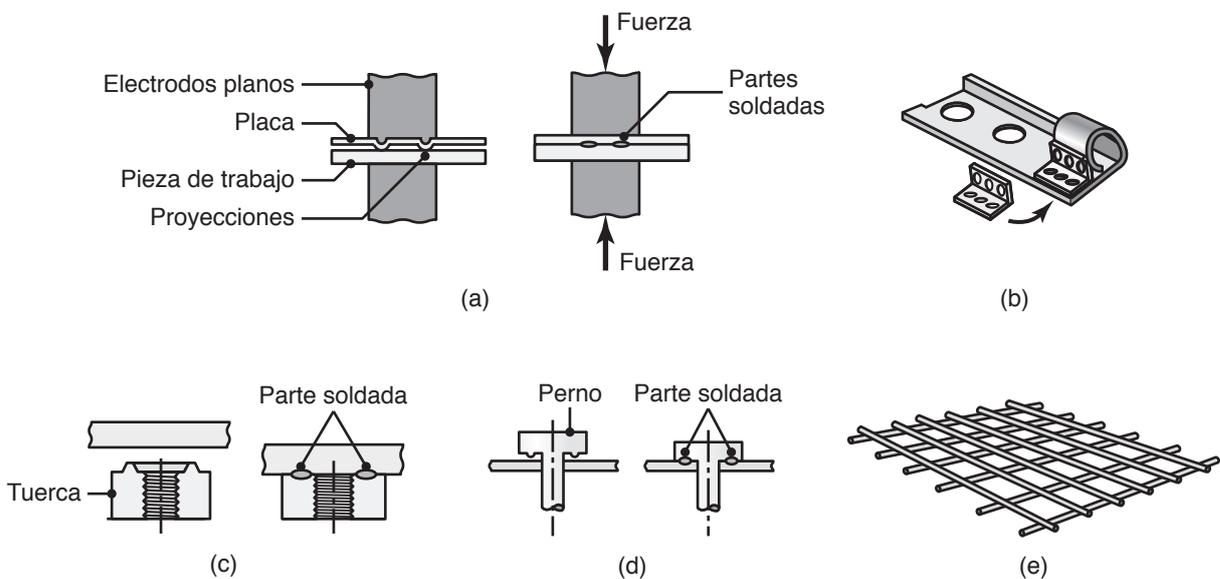


FIGURA 31.12 (a) Ilustración esquemática de la soldadura por resistencia de proyección. (b) Soporte soldado. (c) y (d) Soldadura de proyección de tuercas o pernos roscados. (e) Parrillas soldadas por resistencia de proyección.

31.5.5 Soldadura a tope por presión

En la *soldadura a tope por presión* (FW, por sus siglas en inglés), también llamada **soldadura a tope por rebaba**, se genera calor muy rápidamente con el arco a medida que los extremos de los dos miembros comienzan a hacer contacto y se desarrolla un arco eléctrico en la unión (figura 31.13a). Después de que se alcanza la temperatura apropiada y la interfase empieza a ablandarse, se aplica una fuerza axial a una velocidad controlada, lo que produce una soldadura por deformación plástica de la unión. El mecanismo involucrado se llama *recalcado caliente*, también se usa el término *soldadura por recalcado* (UW, por sus siglas en inglés) para este proceso. Durante el proceso se expulsa parte de metal fundido de la unión como una lluvia de chispas, de ahí el nombre de *soldadura por rebaba*. Debido a la presencia de un arco, el proceso también puede clasificarse como soldadura por arco.

Durante la operación se expulsan impurezas y contaminantes y se quema una cantidad significativa de material. La calidad de la unión es buena y se puede maquinarse posteriormente para mejorar más su aspecto. Las máquinas para la soldadura a tope por presión usualmente son automáticas y grandes, además cuentan con una amplia variedad de suministros de energía que van de 10 a 1500 kVA.

El proceso de UW es apropiado para unir por los extremos o por los bordes tiras y láminas de metales semejantes o disímiles de 0.2 a 25 mm (de 0.01 a 1 pulg) de espesor, también para unir por los extremos barras de 1 a 75 mm (0.05 a 3 pulg) de diámetro. Las secciones más delgadas tienden a romperse por la fuerza axial que se aplica durante la soldadura. Los anillos elaborados por formado (con los métodos ilustrados en la figura 16.22) se pueden unir con soldadura a tope por presión. Además, el proceso también se utiliza para reparar las cuchillas de sierras de banda rotas (sección 24.5) utilizando accesorios que se montan en el marco de la sierra de banda.

El proceso de soldadura por rebaba se puede automatizar para tener operaciones de soldadura repetibles. Aplicaciones comunes son la unión de tubos y formas tubulares de muebles metálicos, puertas y ventanas. El proceso también se usa para soldar los bordes de láminas o bobinas de alambre, en molinos de laminación que operan continuamente (capítulo 13) y en la alimentación de equipo para trefilar alambre (sección 15.11). En

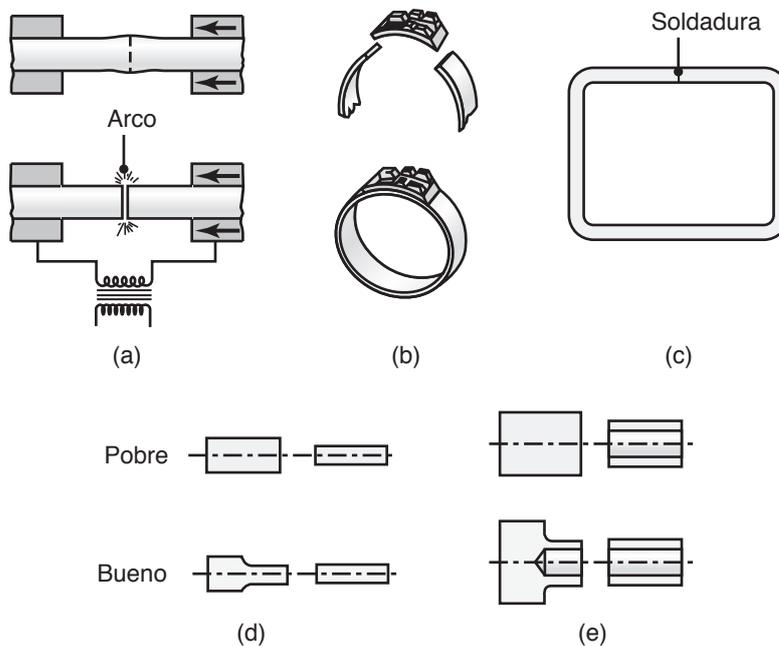


FIGURA 31.13 (a) Proceso de soldadura a tope por presión para soldar por los extremos barras sólidas o partes tubulares. (b) y (c) Partes comunes hechas con soldadura a tope por presión. (d) y (e) Algunos lineamientos de diseño para la soldadura a tope por presión.

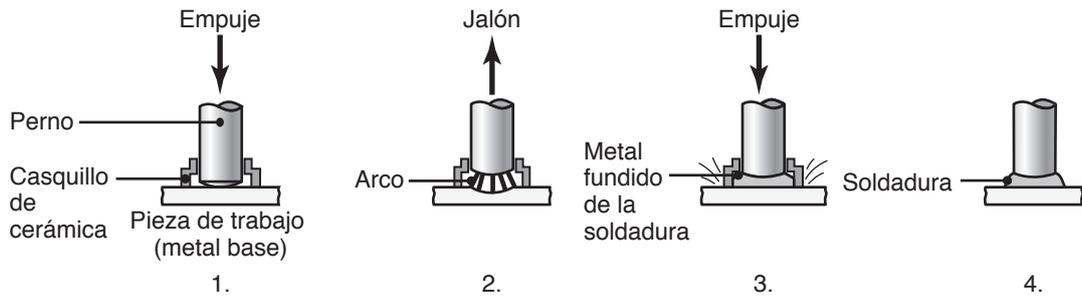


FIGURA 31.14 Secuencia de operaciones en la soldadura de pernos, que por lo común se usa para soldar barras, cilindros roscados y diversos sujetadores sobre placas metálicas.

las figuras 31.13d y e se dan algunos lineamientos de diseño para unir superficies con soldadura a tope por presión; observe la importancia de tener secciones transversales uniformes en la unión.

31.5.6 Soldadura de pernos

La *soldadura de pernos* (SW, por sus siglas en inglés), también llamada *soldadura de pernos por arco*, es similar a la soldadura a tope por presión. El perno, que puede ser un birlo con rosca, percha o manija, sirve como uno de los electrodos mientras se une a otro componente, por lo general una placa plana (figura 31.14). Por lo común la polaridad para el aluminio es de electrodo positivo de corriente directa (DCEP, por sus siglas en inglés); para acero es de electrodo negativo de corriente directa (CDEN, por sus siglas en inglés).

Con el fin de concentrar el calor generado, impedir la oxidación y retener el metal fundido en la zona de la soldadura, se coloca alrededor de la unión un anillo de cerámica desechable (llamado *casquillo*). El equipo para la soldadura de pernos se puede automatizar, con diferentes controles para hacer el arco y aplicar presión. También se dispone de equipo portátil para la soldadura de pernos. Algunas aplicaciones incluyen carrocerías de automóviles, paneles eléctricos y armado de barcos; el proceso también se observa en la construcción de inmuebles.

En la *soldadura de pernos por descarga de capacitores*, o condensadores, se produce un arco de CD desde un banco de condensadores. No se requiere casquillo o fundente porque el tiempo de la soldadura es del orden de sólo 1 a 6 ms. La elección entre este proceso y la soldadura de pernos por arco depende de factores como los tipos de metales a unir, el espesor de la pieza de trabajo y su sección transversal, el diámetro del perno y la forma de la unión.

31.5.7 Soldadura por percusión

Los procesos de soldadura por resistencia que se han descrito suelen emplear un transformador eléctrico para cubrir los requerimientos de energía; una alternativa es que la energía eléctrica para la soldadura se puede almacenar en un condensador. La *soldadura por percusión* (PEW, por sus siglas en inglés) utiliza esta técnica, en la cual la energía se descarga en un tiempo de 1 a 10 ms con el fin de desarrollar mucho calor localizado en la unión. El proceso es útil donde debe evitarse el calentamiento de los componentes adyacentes a la unión, como en los ensamblajes electrónicos y conductores eléctricos.

EJEMPLO 31.3 Soldadura con resistencia *versus* soldadura con rayo láser en la manufactura de latas

Durante muchos años los cuerpos cilíndricos de las latas de alimentos y productos domésticos se han unido con soldadura por resistencia con costura (con una unión traslapada en un lado de la lata). A principios de 1987

se introdujo la tecnología de soldadura con rayo láser en la industria de fabricación de latas. Las uniones se sueldan por láser con la misma productividad de la soldadura por resistencia, pero con las ventajas siguientes:

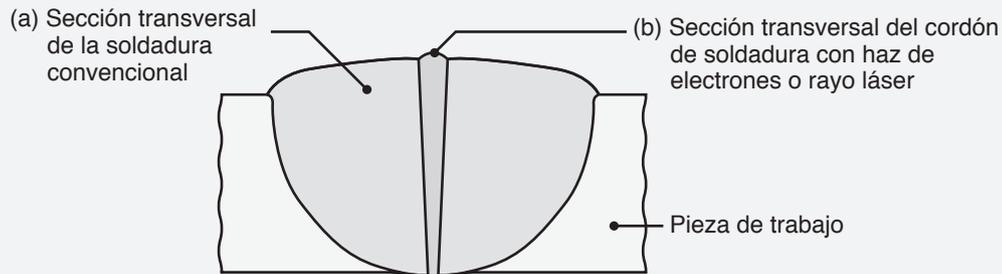


FIGURA 31.15 Tamaños relativos de los cordones de soldadura obtenidos por la soldadura por arco de gas tungsteno y por haz de electrones o rayo láser.

- Al contrario de las uniones traslapadas adecuadas para la soldadura por resistencia, la soldadura con láser utiliza uniones a tope, con lo que se ahorra material. Si se multiplica por los miles de millones de latas que se fabrican cada año, esta cantidad se convierte en un ahorro significativo.
- Debido a que las soldaduras con láser tienen una zona muy angosta (figura 31.15; vea también la figura 30.15), el área no impresa en la superficie de la lata (llamada margen de impresión) se reduce mucho. Como resultado, mejora la apariencia de la lata y su aceptación por parte del consumidor.
- La resistencia de la unión traslapada por la soldadura puede quedar sujeta a la corrosión originada en el contenido de la lata (que puede ser ácido, como el jugo de tomate). Este efecto puede cambiar el sabor y ser un riesgo potencial de demandas. La unión a tope hecha por la soldadura con rayo láser elimina este problema.

Fuente: Cortesía de G. F. Benedict.

31.6 Soldadura por explosión

En la *soldadura por explosión* (EXW, por sus siglas en inglés), se aplica presión al detonar una capa de explosivo colocado sobre uno de los componentes que se van a unir, llamado la *placa que impacta* (figura 31.16). Las presiones desarrolladas al contacto son extremadamente altas (vea también *endurecimiento con explosivos*, sección 34.2) y la energía cinética de la placa que golpea a su opuesta produce una interfase ondulante. Este impacto une mecánicamente las dos superficies (figuras 31.16b y c), de modo que también tiene lugar una soldadura por presión por deformación plástica. Como resultado, la resistencia de la unión en la soldadura por explosión es muy grande.

El explosivo puede ser en forma de lámina de plástico flexible, cuerda, granulada o líquida y se adhiere o presiona sobre la placa que impacta. La velocidad de la detonación suele estar en el rango de 2400 a 3600 m/s (8000 a 12 000 pies/s); esto depende del tipo de explosivo, del espesor de la capa explosiva y de la densidad del empaque de ésta. Hay una velocidad mínima necesaria para que ocurra la soldadura con este proceso. La explosión se efectúa con un detonador estándar comercial.

Este proceso, desarrollado en la década de 1960, es particularmente apropiado para enchapar una placa o palanquilla con un metal disímulo. Se han enchapado con explosión placas tan grandes como de 6 m × 2 m (20 pies × 7 pies); después se pueden hacer secciones más delgadas por rolado. Los tubos y conductos se pueden unir a agujeros en las placas superiores de calentadores e intercambiadores de calor colocando el explosivo en el interior del tubo; la explosión expande el tubo. Este tipo de soldadura es inherentemente peligrosa, por lo que requiere un manejo seguro por parte de personal bien capacitado y experimentado.

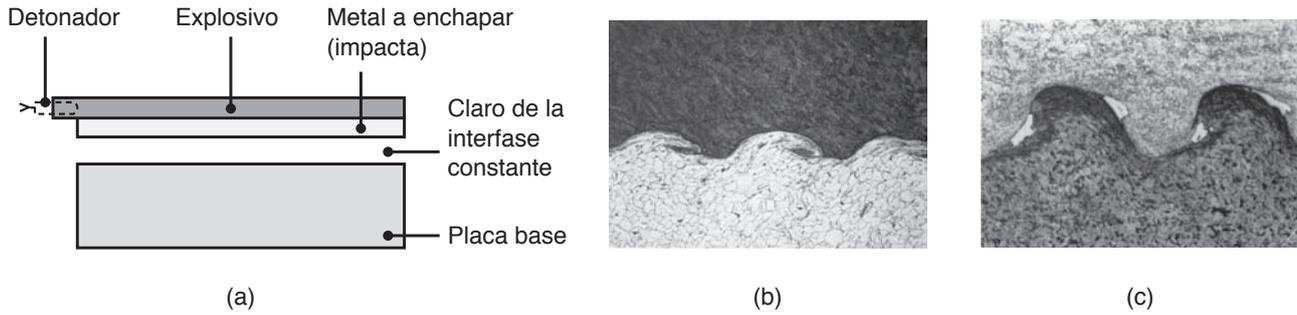


FIGURA 31.16 (a) Ilustración esquemática del proceso de soldadura por explosión. (b) Sección transversal de una unión soldada por explosión: titanio (parte superior) y acero al bajo carbono (parte inferior). (c) Aleación de hierro-níquel (superior) y acero al bajo carbono (abajo).

31.7 Soldadura por difusión

La *soldadura por difusión* (DFW, por sus siglas en inglés), también conocida como **unión** o **liga por difusión**, es un proceso en el cual la resistencia de la unión resulta sobre todo de la difusión (movimiento de los átomos a través de la interfase) y, en segundo lugar, de la deformación plástica de las superficies que se empalman. Este proceso requiere temperaturas de alrededor de $0.5 T_m$ (donde T_m es el punto de fusión del metal en la escala absoluta de temperatura) para tener una tasa de difusión lo suficientemente alta entre las partes que se van a unir (vea también las secciones 1.7 y 1.8).

La interfase en la soldadura por difusión tiene esencialmente las mismas propiedades físicas y mecánicas que las del metal base; su resistencia depende de (a) la presión; (b) la temperatura; (c) el tiempo de contacto y (d) la limpieza de las superficies a empalmar. Estos requerimientos pueden relajarse si se usa un metal de aporte en la interfase, en la cual pueden formarse compuestos intermetálicos frágiles, lo que depende de los materiales unidos, y esto puede evitarse si primero se electrodepositan las superficies con aleaciones de metales apropiados. En la soldadura por difusión, la presión puede ser aplicada por pesos muertos, prensas, presión diferencial de gases o la expansión térmica de las partes que se han de unir. Por lo general las partes se calientan en un horno o con una resistencia eléctrica. También se emplean autoclaves de alta presión para unir piezas complejas.

Aunque la DFW se desarrolló en la década de 1970 como una tecnología moderna de soldadura, el principio de soldadura por difusión data de siglos, cuando los herreros unían oro con cobre para crear un producto llamado **oro chapado**. Primero se colocaba una capa delgada de chapa de oro sobre cobre, luego se aplicaba presión mediante un peso sobre la chapa. Después se colocaba el ensamble en un horno y se dejaba ahí hasta que se formaba una adhesión fuerte, de ahí que el proceso se llame también *soldadura por presión en caliente* (HPW, por sus siglas en inglés).

La soldadura por difusión por lo general es más adecuada para unir metales disímboles y se usa también para metales reactivos (como el titanio, berilio, zirconio y aleaciones refractarias metálicas) y para materiales compósitos como los de matriz metálica (sección 9.5). La soldadura por difusión es un mecanismo importante de sinterizar en la metalurgia de polvos (sección 17.4). Debido a que la difusión implica la migración de átomos a través de la unión, la DFW es más lenta que otros procesos de soldadura.

Aunque la soldadura por difusión se usa para fabricar partes complejas en pequeñas cantidades para las industrias aeroespacial, nuclear y electrónica, se ha automatizado con el fin de hacerla apropiada y económica también para volúmenes de producción de moderados a altos. A menos que sea automatizada, se requiere una capacitación y habilidad

considerable del operador. El costo del equipo se relaciona aproximadamente con el área soldada por difusión y está en el rango de \$3 a \$6 dólares estadounidenses/mm² (\$2000 a \$4000/pulg²).

EJEMPLO 31.4 Aplicaciones de la soldadura por difusión

La soldadura por difusión es apropiada en especial para metales como el titanio y las superaleaciones usadas en aeronaves militares. Las posibilidades de diseño permiten la conservación de los materiales estratégicos

caros y la reducción de los costos de manufactura. El avión militar ilustrado en la figura 31.17 tiene más de 100 partes unidas por difusión, algunas de las cuales se muestran.

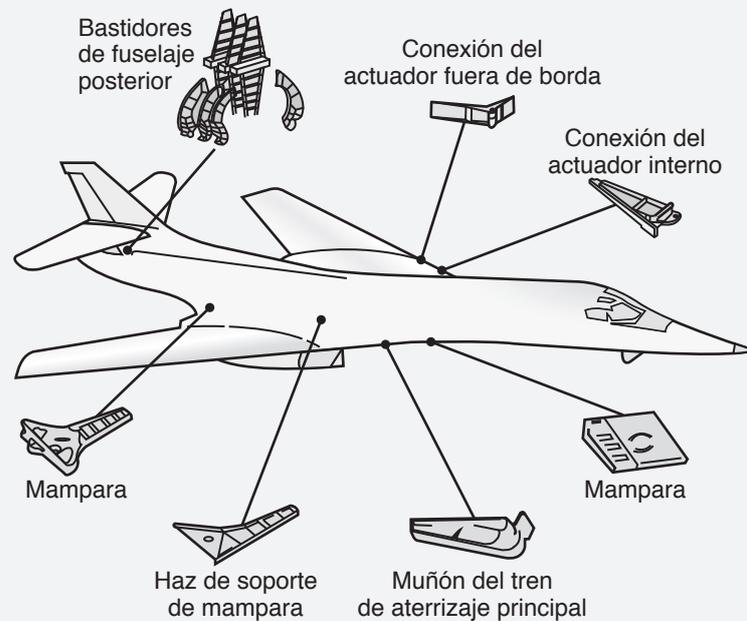


FIGURA 31.17 Aplicaciones aeroespaciales de la soldadura por difusión.

Formado superplástico con soldadura por difusión. Las estructuras de placas metálicas se pueden fabricar por la combinación de la *soldadura por difusión* con el *formado superplástico* (vea también la sección 16.10). En la figura 31.18 se muestran estructuras comunes en las que se han unido y formado láminas planas por difusión. Después de unir por difusión en ubicaciones seleccionadas de las láminas, las regiones no unidas (*despegadas*) se expanden en un molde por medio de presión de aire o fluido. Estas estructuras son delgadas y tienen relaciones elevadas de rigidez a peso, por lo que son particularmente útiles en aplicaciones aéreas y aeroespaciales.

El formado superplástico con soldadura por difusión mejora la productividad al eliminar el número de partes en una estructura, las sujeciones mecánicas, mano de obra y costo. Produce partes con buena exactitud dimensional y pocos esfuerzos residuales. Se desarrolló por primera vez en la década de 1970 y ahora esta tecnología se encuentra muy avanzada para estructuras de titanio y de aluminio (generalmente se emplea Ti-6Al-4V y el duraluminio 7075-T6) además de otras aleaciones para aplicaciones aeroespaciales.

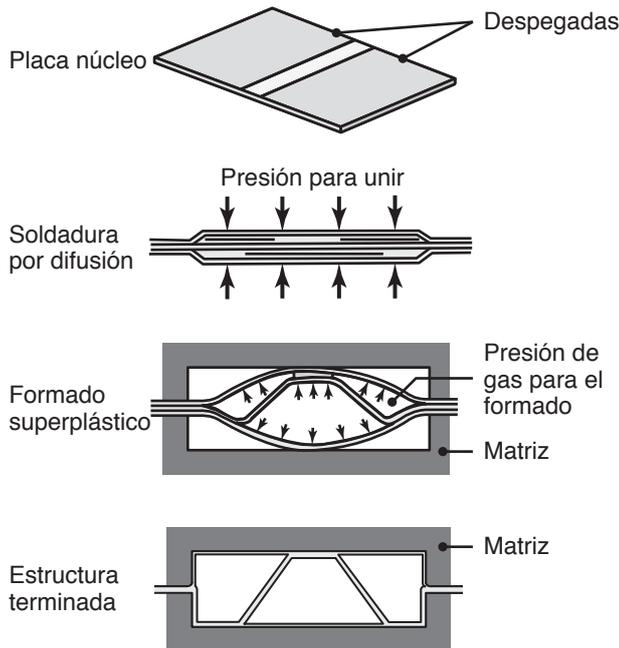


FIGURA 31.18 Secuencia de operaciones en la fabricación de una estructura por medio de la soldadura por difusión y el formado de superplásticos de tres placas originalmente planas; vea también la figura 16.51. Fuente: (a) y (d) tomado de D. Stephen y S. J. Swadling; (b) y (c) cortesía de Rockwell International Corp.

También pueden usarse otros procesos de soldadura en placas superplásticas posteriormente soldadas, sobre todo con soldadura por fricción y por fricción de agitación.

31.8 Economía de las operaciones de soldadura

Las características, ventajas y limitaciones de los procesos de soldadura descritos hasta este momento han incluido breves análisis sobre sus costos. En las tablas 30.1 y VI.1 se muestran los costos relativos de algunos procesos seleccionados. Como en todas las demás operaciones de manufactura, los costos de los procesos de soldadura y adhesión varían mucho, lo que depende de factores como la capacidad del equipo, nivel de automatización, habilidad de la mano de obra requerida, calidad de la soldadura, tasa de producción y preparación que se necesita, así como de varias consideraciones específicas de una operación de unión en particular.

Los *costos de soldadura y unión* de ciertas operaciones comunes (todas descritas en los capítulos 30 a 32) se resumen como sigue:

- *Altos*: soldadura fuerte y sujetadores (como pernos y tuercas), ya que se requiere hacer perforaciones y considerar los costos de los sujetadores.
- *Intermedios*: soldadura por arco, remachado, unión con adhesivos.
- *Bajos*: soldadura por resistencia, costura y plegado, ya que estas operaciones son relativamente simples de hacer y automatizar.

Los *costos del equipo* para soldar se resumen así:

- *Altos* (\$100 000 a \$200 000): soldadura con haz de electrones y rayo láser.
- *Intermedios* (\$5000 a \$50 000 o más): soldadura de puntos, por arco sumergido, por arco de gas metálico, arco de gas tungsteno, arco de núcleo fundente, electrogas, electroescoria, arco de plasma y ultrasónica.
- *Bajos* (más de \$500): soldadura por arco de electrodo revestido y por gas oxicom bustible.

Los costos de la mano de obra de la soldadura por lo general son más altos que los de otras operaciones del trabajo de metales porque se requiere habilidad del operador, tiempo para soldar y preparación para hacerlo. Gran parte también depende del nivel de automatización del equipo utilizado, inclusive el uso de robótica y controles computarizados programados para seguir una trayectoria prescrita (llamada *seguimiento de costura*) durante la soldadura. Por ejemplo, se ha observado que en sistemas con controles robóticos, el tiempo real de soldadura llega a ser 80% del total, mientras que en las operaciones manuales (vea la tabla 30.1) el tiempo real dedicado por el operador a la soldadura es de sólo 30% del tiempo total.

A continuación se resumen los *costos de la mano de obra*:

- *Altos a intermedios*: soldadura por gas oxicom bustible y por arco de electrodo revestido.
- *Altos a bajos*: soldadura con haz de electrones y con rayo láser, así como por arco de núcleo fundente.
- *Intermedios a bajos*: soldadura con arco sumergido.

CASO DE ESTUDIO 31.1 Soldadura de pistones por fricción

Los fabricantes de camiones pesados han realizado un esfuerzo sostenido para diseñar y manufacturar motores diesel con emisiones reducidas. Son varias las tecnologías que más han prevalecido desde la década de 1980, lo que refleja la necesidad de adoptar un *diseño verde* (vea las secciones I.4 y 40.4). La recirculación de los gases de escape (reintroducción de una parte de ellos en la corriente de ingreso al motor) se ha vuelto un estándar y se hace para disminuir las emisiones de óxido nitroso. Sin embargo, esta estrategia lleva a tener una combustión menos eficiente y menor duración de los componentes debido a la presencia de partículas abrasivas que desgastan (vea la sección 33.5) y de ácidos que recirculan en el motor. Para mantener e incluso mejorar la eficiencia, los fabricantes de motores han incrementado las presiones de los cilindros y las temperaturas de operación, que en conjunto llevan a un ambiente aún más demandante para los componentes de los motores.

Se descubrió que los pistones tradicionales de aluminio de los motores diesel (en el mercado de Estados Unidos) no funcionaban de modo confiable en los diseños modernos. Los problemas identificados con los pistones eran (a) tendencia a hacer “hongos” y fracturarse bajo las altas presiones del encendido en el cilindro; (b) enfriamiento inadecuado del pistón y (c) desgaste adhesivo severo (gripado) en el perno que

une al pistón con la biela conectora. Una solución, que se ilustra en la figura 31.19, es un pistón Monoacero que tiene los siguientes atributos en su diseño:

- El pistón está hecho de acero (capítulo 5), que tiene mayor resistencia y mejores propiedades mecánicas con respecto a las altas temperaturas que las aleaciones de aluminio (sección 6.2) usadas anteriormente.
- Un diseño en dos piezas que permite la incorporación de una cámara de aceite para que circule aceite refrigerante en el pistón. Una de las principales ventajas del diseño Monoacero es el uso de una cámara muy grande, lo que da como resultado una eficaz remoción de calor hacia fuera del pistón. Se ha demostrado que este diseño reduce las temperaturas del pistón en los anillos en unos 40 °C, en comparación con diseños anteriores.
- El faldón del pistón es mucho más rígido que el de aluminio (debido al mayor módulo de elasticidad del acero), lo que da como resultado una deformación menor y permite diseños con holguras más ajustadas. Esta característica hace que el pistón sea más estable (más concéntrico con respecto al calibre del cilindro) y tenga menos consumo de aceite, lo que reduce las dañinas emisiones del escape.

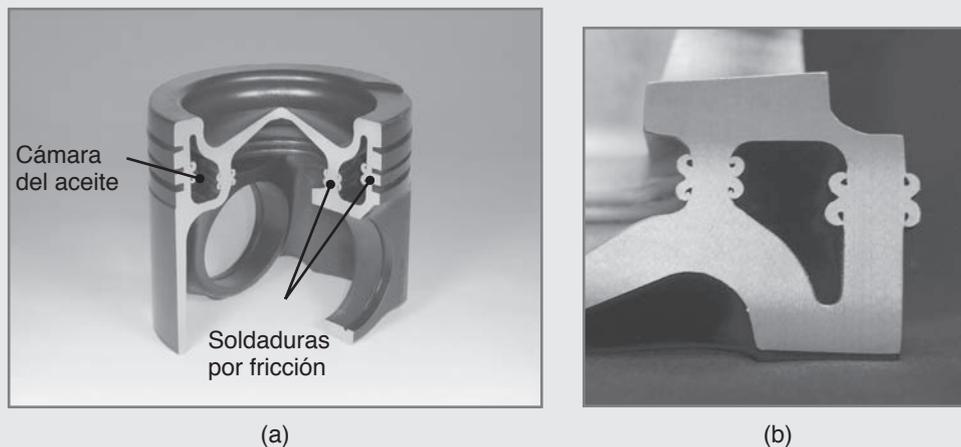


FIGURA 31.19 El pistón Monoacero. (a) Corte del pistón, donde se aprecia la cámara del aceite y las secciones soldadas por fricción; (b) detalle de las soldaduras por fricción antes de que se elimine la rebaba externa y se maquinen las muescas cilíndricas.

(continúa)

Los pistones Monoacero se producen a partir de dos componentes forjados, los cuales se maquinan antes de soldarse. El proceso usado para unir estos componentes es la soldadura por fricción de inercia (sección 31.4), que tiene las ventajas siguientes en esta aplicación particular:

- El proceso lleva a soldaduras bien controladas, confiables y alta calidad repetible.
- Las soldaduras por fricción son continuas y no implican porosidad, lo que produce una soldadura de alta resistencia que sella la cámara del aceite.
- El proceso de soldadura es muy apto para optimizarse, pues las principales variables del proceso son la energía (o velocidad del eje para un volantín dado) y la presión de contacto.

Debido a que se controla enteramente por una máquina, la soldadura por fricción no requiere intervención ni habilidad del operador. Aunque la inversión de

capital es significativa en comparación con la de otras tecnologías apropiadas de soldadura, la calidad y capacidad de esta aplicación es mucho más favorable.

El pistón que se muestra en la figura 31.19 se produjo en una soldadora por fricción de inercia con capacidad para ejercer una fuerza de 250 toneladas usando una velocidad periférica de 7.5 m/s (1500 pies/min) y una presión de contacto de 140 MPa (20 ksi); vea la figura 31.3. Como puede verse, la zona de la soldadura tiene la forma de rebaba óptima (figura 31.4); se elimina luego de la superficie exterior del pistón por medio de una operación de torneado (sección 23.2), después de lo cual se esmerila el faldón del pistón (sección 26.3). Los tiempos de producción por lo general son de 40 a 60 segundos, pero pueden ser mayores o menores en función del tamaño del pistón.

Fuente: Cortesía de D. Adams, Manufacturing Technology, Inc., y K. Westbrooke, Federal Mogul, Inc.

RESUMEN

- Además de los procesos de unión tradicionales de soldadura por gas oxcombustible y por arco, también se utilizan otros procesos que se basan en producir una unión fuerte bajo presión o calor.
- En estos procesos son importantes la preparación y limpieza de la superficie. La presión se aplica en forma mecánica o con explosivos. El calor se suministra de manera externa (con resistencia eléctrica o en hornos) o se puede generar internamente (como en la soldadura por fricción).
- La combinación de los procesos de soldadura por difusión y de formado superplástico mejora la productividad y la capacidad de fabricar partes complejas en forma económica.
- Como en todas las operaciones de manufactura, hay ciertos riesgos inherentes en las operaciones de soldadura. Algunos se relacionan con la maquinaria y equipo utilizados, otros con la naturaleza del proceso en sí (como en la soldadura por explosión). En las áreas de trabajo siempre deben tomarse las precauciones de seguridad apropiadas.

TÉRMINOS CLAVE

Casquillo	Soldadura de puntos por rolado	Soldadura por fricción lineal	Soldadura por resistencia de puntos
Cuerno	Soldadura en frío	Soldadura por percusión	Soldadura por rolado
Formado superplástico	Soldadura por difusión	Soldadura por resistencia	Soldadura ultrasónica
Oro chapado	Soldadura por explosión	Soldadura por resistencia de alta frecuencia	Sonotrodo
Pepita soldada	Soldadura por fricción	Soldadura por resistencia de costura	Superficies de empalme
Placa que impacta	Soldadura por fricción de agitación	Soldadura por resistencia de proyección	Transductor
Soldadura a tope por presión	Soldadura por fricción de inercia		Unión por rolado
Soldadura de costura			
Soldadura de estado sólido			
Soldadura de pernos			

BIBLIOGRAFÍA

- American Welding Society, Welding Handbook*, 9a. ed., 2011.
- ASM Handbook*, Vol. 6: *Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International, 1993.
- Bowditch, W. A., Bowditch, K. E. y Bowditch, M. A., *Welding Technology Fundamentals*, 4a. ed., Goodheart-Willcox, 2009.
- Cary, H. B., *Modern Welding Technology*, 6a. ed., Prentice Hall, 2004.
- Houldcroft, T., *Welding and Cutting: A Guide to Fusion Welding and Associated Cutting Processes*, Industrial Press, 2001.
- Jeffus, L. F., *Welding: Principles and Applications*, 7a. ed., Delmar Publishers, 2011.
- Kou, S., *Welding Metallurgy*, 2a. ed., Wiley-Interscience, 2002.
- Lagoda, T., *Life Estimation of Welded Joints*, Springer, 2008.
- Mouser, J. D., *Welding Codes, Standards, and Specifications*, McGraw-Hill, 1997.
- Nicholas, M. G., *Joining Processes: Introduction to Brazing and Diffusion Bonding*, Chapman & Hall, 1998.
- Weman, K., *Welding Processes Handbook*, 2a. ed., Woodhead Publishing, 2012.
- Zhang, H. y Senkara, J., *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*, 2a. ed., CRC Press, 2011.

PREGUNTAS DE REPASO

- 31.1** Explique lo que se entiende por soldadura de estado sólido.
- 31.2** ¿Qué es la soldadura en frío? ¿Por qué se llama así?
- 31.3** ¿Qué es (a) un casquillo; (b) oro chapado y (c) placa que impacta?
- 31.4** En los procesos de estado sólido, ¿qué son las superficies que empalman?
- 31.5** ¿Cuál es el principio básico de (a) la soldadura ultrasónica y (b) la soldadura por difusión?
- 31.6** Explique cómo se genera el calor en la soldadura ultrasónica de (a) metales y (b) termoplásticos.
- 31.7** Describa las ventajas y limitaciones de la soldadura por explosión.
- 31.8** Enuncie el principio de los procesos de soldadura por resistencia.
- 31.9** ¿Qué materiales recomendaría el lector para los electrodos de la soldadura por resistencia?
- 31.10** ¿Qué tipo de productos son adecuados para la soldadura de pernos? ¿Por qué?
- 31.11** ¿Cuál es la ventaja de la soldadura por fricción lineal con respecto a la soldadura por fricción de inercia?
- 31.12** ¿Cuáles son las principales formas de la soldadura por fricción?
- 31.13** ¿Cuáles de los procesos de este capítulo son aplicables a los polímeros?
- 31.14** Describa cómo funciona la soldadura a tope de alta frecuencia.
- 31.15** ¿Qué materiales se usan por lo común en la soldadura por difusión?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 31.16** Haga una lista de los procesos descritos en este capítulo y clasifíquelos de acuerdo con (a) la presión alcanzada; (b) la temperatura máxima, y (c) lo apropiado para unir materiales disímboles.
- 31.17** Elabore una lista de abreviaturas estándar para los procesos de soldadura. Por ejemplo, la soldadura en frío es CW y la soldadura por rolado es ROW.
- 31.18** Explique las razones por las que se desarrollaron los procesos descritos en este capítulo.
- 31.19** Explique las semejanzas y diferencias entre los procesos de unión descritos en este capítulo y los del capítulo 30.
- 31.20** Describa sus observaciones acerca de las figuras 31.16c y d.
- 31.21** ¿Le preocuparía el tamaño de los cordones de soldadura, como los que se muestran en la figura 31.15? Explique.
- 31.22** ¿Qué ventajas tiene la soldadura por fricción con respecto a otros métodos descritos en este capítulo y en el anterior?
- 31.23** Haga una lista de los parámetros del proceso que piense afectan la resistencia de la soldadura de un proceso por fricción y explique por qué cree que dichos parámetros son importantes.
- 31.24** Describa el significado de las superficies de empalme.
- 31.25** Analice los factores que influyen en la resistencia de (a) una soldadura por difusión y (b) un componente soldado en frío.
- 31.26** ¿Cuáles son las fuentes de calor para los procesos descritos en este capítulo?
- 31.27** ¿Los procesos de unión por rolado pueden aplicarse a varias configuraciones de parte? Explique.
- 31.28** ¿Por qué la soldadura por difusión es un proceso de fabricación atractivo cuando se combina con el formado superplástico de láminas metálicas?

31.29 Ponga en una lista y explique los factores involucrados en la resistencia de los cordones de soldadura.

31.30 Dé algunas razones por las que es común usar la soldadura de puntos en las carrocerías de automóvil y en aparatos grandes.

31.31 Explique el significado de la magnitud de la presión aplicada a través de electrodos durante una operación de soldadura de puntos.

31.32 Mencione algunas aplicaciones de (a) soldadura a tope por presión; (b) soldadura de pernos y (c) soldadura por percusión.

31.33 Analice la necesidad y el rol de los dispositivos de sujeción del trabajo en las operaciones de soldadura descritas en este capítulo.

31.34 Estudie la figura 31.4 y explique por qué se han desarrollado esas formas particulares en la zona de fusión como una función de la presión y la velocidad. Comente acerca de la influencia de las propiedades del material.

31.35 ¿Podría el proceso que se muestra en la figura 31.11 aplicarse también a formas de parte distintas de las redondas? Explique y dé algunos ejemplos específicos.

31.36 En las pruebas de soldadura de puntos, ¿cuál sería la razón de las fallas ocurridas en las ubicaciones que se muestran en la figura 31.9?

31.37 ¿Puede la soldadura por fricción de agitación usarse para partes de metalurgia de polvos? Explique.

31.38 ¿Alguno de los procesos descritos en este capítulo utiliza un metal de aporte? Explique.

31.39 ¿Cuáles procesos descritos en este capítulo no se ven afectados por una película de óxido? Explique.

31.40 Considere la situación en la que se sueldan dos componentes redondos. Usted cree que se soldaron por fricción y que la rebaba se eliminó con maquinado. ¿Cómo confirmaría o desearía su suposición?

31.41 ¿Hay alguna ventaja en precalentar las piezas de trabajo en la soldadura por fricción? Explique.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

31.42 Se sabe que la energía requerida en la soldadura ultrasónica está relacionada con el espesor de la pieza de trabajo multiplicado por la dureza. Explique por qué existe esta relación.

31.43 Dos láminas planas de cobre (cada una con espesor de 1.0 mm) se unen con soldadura de puntos y utilizando una corriente de 7000 A con un tiempo de flujo de corriente de 0.3 s. Los electrodos miden 4 mm de diámetro. Estime el calor generado en la zona de la soldadura. Suponga que la resistencia es de $200 \mu\Omega$.

31.44 Calcule el aumento de temperatura en el problema 31.43, suponga que el calor que se genera está confinado al volumen del material que se encuentra directamente entre los dos electrodos redondos y que la temperatura se distribuye de manera uniforme.

31.45 Calcule el rango de corrientes permisibles en el problema 31.43 si la temperatura debe estar entre 0.7 y 0.8 veces la temperatura de fusión del cobre. Repita este problema para acero al carbono.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

31.46 Comente acerca de las limitaciones del tamaño de la pieza de trabajo y de la forma (si las hubiera) para cada uno de los procesos descritos en este capítulo.

31.47 Explique cómo fabricaría usted las estructuras que se ilustran en la figura 31.18 con otros métodos distintos de la soldadura por difusión y el formado superplástico.

31.48 Describa las formas de partes que no se pueden unir por medio de los procesos descritos en este capítulo. Dé ejemplos específicos.

31.49 Haga comentarios sobre la factibilidad de aplicar la soldadura por explosión en un ambiente fabril.

31.50 Exponga sus observaciones acerca de los lineamientos de diseño de la soldadura ilustrados en las figuras 31.13d y e.

31.51 En relación con la figura 14.11b, ¿podría el lector usar cualquiera de los procesos descritos en los capítulos 30 y 31 para fabricar un perno grande soldando la cabeza con el tronco? Explique las ventajas y limitaciones de este enfoque.

31.52 Explique cómo podrían hacerse las partes soldadas por proyección que se muestran en la figura 31.12 siguiendo cualquiera de los procesos descritos en este libro.

31.53 Con una lupa, revise la orilla de monedas de Estados Unidos, como las de diez y de cinco centavos, y haga comentarios sobre sus observaciones.

31.54 Describa los métodos que usaría para eliminar la rebaba de soldaduras como las que se ilustran en la figura 31.13. ¿Cómo automatizaría dichos métodos para una planta de alta producción?

31.55 En el proceso de unión por rolado que se ilustra en la figura 31.1, ¿cómo haría para asegurarse de que las interfases están limpias y libres de contaminantes, de modo que se logre una buena adhesión? Explique.

31.56 Revise varios contenedores metálicos de productos para el hogar y de alimentos y bebidas. Identifique aquellos en los que se haya utilizado alguno de los procesos descritos en este capítulo. Describa sus observaciones.

31.57 Revise la carrocería de placa metálica de un automóvil y comente sobre el tamaño y frecuencia de las soldaduras de un punto que se hayan aplicado. ¿Cómo estimaría el número de soldaduras presentes en una carrocería?

31.58 El Alclad está hecho a partir de una aleación de aluminio 5182 y tiene ambos lados recubiertos con una capa delgada de aluminio puro. La aleación 5182 proporciona alta resistencia, mientras que las capas exteriores de aluminio puro dan buena resistencia a la corrosión debido a su película estable de óxido. De ahí que el Alclad se use comúnmente en aplicaciones estructurales aeroespaciales. Investigue otros metales comunes de unión por rolado y sus usos y elabore una tabla de resumen.

31.59 Diseñe un método de ensayo para evaluar la resistencia de la unión en la soldadura por rolado.

31.60 Revise la figura 31.3 y dibuje el patrón de rebaba que esperaría si (a) se soldaran por fricción de inercia dos partes tubulares; (b) se soldaran dos partes elípticas por fricción de inercia y (c) se creara una soldadura a tope con soldadura por fricción lineal.

31.61 Dibuje la microestructura que esperaría si se creara una unión a tope por medio de (a) soldadura por fricción lineal; (b) soldadura por fricción de agitación; (c) soldadura por trituración de costura y (d) soldadura a tope por presión.

Soldadura fuerte, soldadura blanda, unión con adhesivos y procesos de sujeción mecánica

32.1	Introducción	934
32.2	Soldadura fuerte	935
32.3	Soldadura blanda	939
32.4	Unión adhesiva	943
32.5	Sujeción mecánica	949
32.6	Unión de plásticos, cerámicos y vidrios	953
32.7	Economía de las operaciones de unión	957

EJEMPLO:

32.1	Soldadura blanda de componentes en una tarjeta de circuitos impresos	941
------	---	-----

CASO DE ESTUDIO:

32.1	Curado ligero de adhesivos acrílicos para productos médicos	955
------	---	-----

- La soldadura fuerte y la soldadura blanda son diferentes de los procesos de soldadura descritos en capítulos anteriores en el sentido de que la difusión no tiene lugar en la interfase; la resistencia de la unión depende de las fuerzas adhesivas, que con frecuencia aumentan con el uso de un metal de aporte apropiado para producir una unión fuerte.
- La soldadura fuerte y la blanda se distinguen en la temperatura a que se funden los metales de aporte: la fuerte tiene lugar por arriba de los 450 °C (840 °F) y produce uniones más fuertes que la blanda, en tanto que ésta implica temperaturas más bajas. La soldadura blanda se aplica mucho en la industria electrónica.
- La unión con adhesivos es versátil y existe una amplia variedad de ellos para numerosas aplicaciones.
- Luego se describen los procesos de sujeción mecánica, como el uso de tornillos, tuercas, remaches, sujeciones mecánicas o accesorios de presión en las operaciones de ensamblado.
- El capítulo termina con el análisis de consideraciones económicas en las operaciones de unión.

32.1 Introducción

En la mayoría de los procesos de unión descritos en los capítulos 30 y 31, las superficies de empalme (unión) de los componentes se calientan con varios medios externos o internos para causar fusión y adhesión en la unión. Sin embargo, ¿qué pasa si las partes que se van a unir son frágiles, intrincadas, hechas de dos o más materiales con características y dimensiones muy diferentes o los componentes a unir no pueden soportar temperaturas elevadas, como es el caso de los componentes electrónicos?

Este capítulo describe en primer lugar dos procesos de unión, la *soldadura fuerte* y la *soldadura blanda*, las cuales requieren temperaturas más bajas que las usadas en la soldadura por fusión. Los metales de aporte se introducen o esparcen en la unión y se funden por medio de una fuente externa de calor; después de la solidificación se obtiene una unión fuerte (figura 32.1). Estos dos procesos se diferencian arbitrariamente según la temperatura. Las temperaturas para la soldadura blanda son menores que para la fuerte, y la resistencia de una unión obtenida con soldadura blanda es mucho menor.

El capítulo también describe los principios y tipos de *uniones adhesivas*. El antiguo método de unir partes con pegamentos derivados de animales (comúnmente empleado en la encuadernación de libros, etiquetas y empaques) se ha desarrollado hasta convertirse en una tecnología importante de adhesión tanto para materiales metálicos como no metálicos. Los adhesivos modernos son polímeros o compuestos avanzados y es raro que se basen en animales. El proceso de adhesión tiene amplias aplicaciones en numerosos productos industriales y para el consumidor, así como en la industria aeronáutica

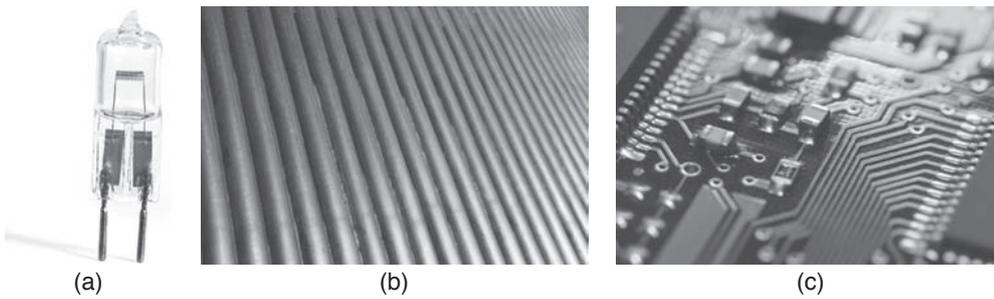


FIGURA 32.1 Ejemplos de uniones con soldadura fuerte y blanda. (a) Filamento de foco con su resistencia adherida por soldadura fuerte; (b) ensamble de tubos de cohete por medio de soldadura fuerte; (c) tarjeta de circuitos con soldadura blanda.

y aeroespacial. Los materiales a pegar como termoplásticos, cerámicos y vidrios, con el mismo material o con otros diferentes, presentan varios retos.

Aunque todas las uniones descritas hasta este momento son de naturaleza permanente, en muchas aplicaciones los componentes adheridos tienen que separarse para fines de reemplazo de piezas desgastadas o descompuestas, mantenimiento general o reparación. Además, algunas uniones están diseñadas para no ser permanentes, pero deben ser fuertes. Entonces, la solución obvia es usar métodos de *sujeción mecánica* como pernos, tornillos, tuercas y varios sujetadores especiales.

32.2 Soldadura fuerte

La **soldadura fuerte** es un proceso de unión en el cual se coloca un **metal de aporte** en la periferia o entre las interfases de las superficies que se van a unir. Después se eleva la temperatura lo suficiente para derretir el metal de aporte pero no los componentes (el metal base), como sería el caso en la soldadura por fusión descrita en el capítulo 30. La expresión *soldadura fuerte* o *latonado*, que proviene del inglés *brazing*, se deriva del término *brass*, que significa “endurecer”; proceso que se usó por primera vez hacia 300 a 2000 a. C.

Se observará que la soldadura fuerte es un proceso de *adhesión de estado líquido-sólido*. Después de que se enfría y solidifica el metal de aporte se obtiene una unión fuerte. Los metales de aporte para este tipo de soldadura por lo general se funden por arriba de 450 °C (840 °F), una temperatura que está por debajo del punto de fusión (*temperatura del sólido*) de los metales a unir (vea, por ejemplo, la figura 4.4).

La figura 32.2a muestra una unión común de soldadura fuerte, donde un material de aporte (*soldadura de alto punto de fusión*) en forma de alambre se coloca por toda la periferia de los componentes que se van a unir. Entonces se aplica calor, por varios medios externos, lo que funde el metal de aporte y, por acción *capilar*, se llena el estrecho espacio cercano (llamado *holgura de la unión*) en las interfases (figura 32.2b). En la **soldadura fuerte**, el metal de aporte (latón, por lo general) se deposita en la unión mediante una

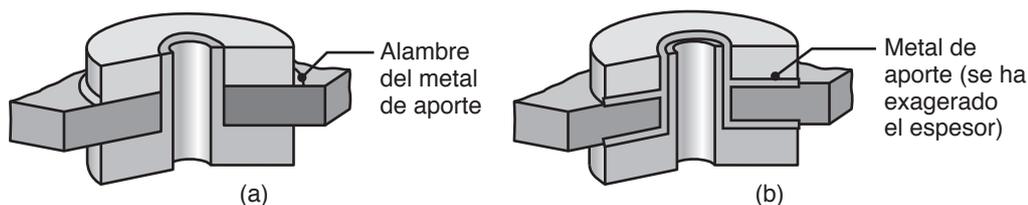


FIGURA 32.2 Ejemplo de soldadura fuerte en un horno (a) antes y (b) después de soldar. El metal de aporte es un alambre adaptado a la forma y una vez derretido avanza por las interfases por acción capilar, con la aplicación de calor.

técnica similar a la soldadura por gas oxicomcombustible (vea la figura 30.1d.) (Para más detalles consulte la sección 32.2.1).

En la figura 32.3 se presentan ejemplos de uniones hechas por soldadura fuerte y blanda. Es posible pegar rápidamente formas intrincadas y ligeras y con poca distorsión, buena resistencia de la unión y con metales disímbolos.

Metales de aporte. Existen varios metales de aporte, con el rango de temperaturas para soldar que se presenta en la tabla 32.1. Observe que, a diferencia de las operaciones de soldadura descritas en los dos capítulos anteriores, los metales de aporte para la soldadura blanda por lo general tienen composiciones que son muy diferentes de las de los metales a unir. Se encuentran disponibles en varias formas, como alambre, barras, anillos, placas y limaduras. Es importante la selección del tipo de metal de aporte y su composición para evitar que la unión se haga *quebradiza* por (a) penetración del metal líquido en la frontera del grano (sección 1.5.2); (b) la formación de *compuestos intermetálicos frágiles* (sección 4.2.2) y (c) *corrosión galvánica* en la unión (sección 3.8).

Debido a la *difusión* entre el metal de aporte y el metal base, las propiedades mecánicas y metalúrgicas de una unión hecha con soldadura fuerte pueden cambiar como resultado de un procesamiento posterior o durante la vida de servicio de la parte pegada. Por ejemplo, cuando se suelda titanio con estaño puro como metal de aporte, es posible que el estaño se difunda por completo en el metal base titanio cuando se les someta a envejecimiento o a tratamiento térmico; en consecuencia, ya no habrá unión.

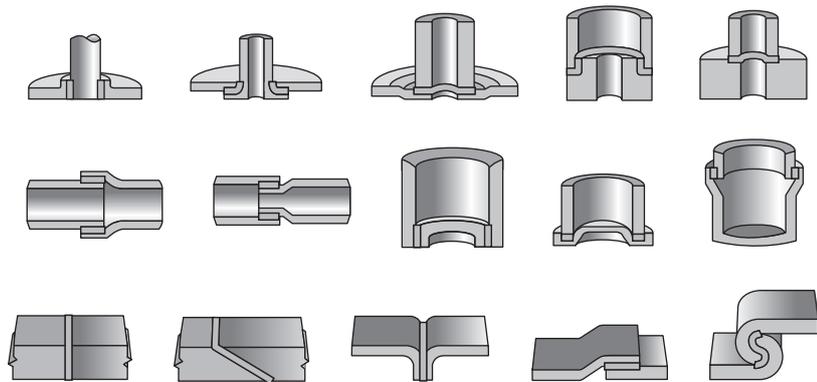


FIGURA 32.3 Diseños de uniones usadas comúnmente en las operaciones de soldadura fuerte. La holgura entre las dos piezas a ser soldadas es un factor importante en la fuerza de unión; si la holgura es demasiado chica, la soldadura de metal fundido no penetrará por completo la interfase, y si es demasiado grande no habrá suficiente acción capilar para que el metal fundido llene la interfase.

TABLA 32.1

Metales de aporte de uso común en la soldadura fuerte de varios metales y aleaciones		
Metal base	Metal de aporte	Temperatura de la soldadura fuerte
Aluminio y sus aleaciones	Aluminio-silicio	570-620
Aleaciones de magnesio	Magnesio-aluminio	580-625
Cobre y sus aleaciones	Cobre-fósforo y oro-cobre-fósforo	700-925
Ferrosos y no ferrosos (excepto aluminio y magnesio)	Aleaciones de plata y cobre, cobre-fósforo, cobre-zinc	620-1150
Aleaciones con base en hierro, níquel y cobalto	Oro-cobre y oro-paladio	900-1100
Aceros inoxidables, aleaciones con base en níquel y cobalto	Níquel-plata	925-1200

Fundentes. En la soldadura fuerte es esencial el uso de un *fundente* debido a que impide la oxidación y remueve las películas de óxido. Los fundentes que se emplean en esta soldadura por lo general están hechos de bórax, ácido bórico, boratos, fluoruros y cloruros. Pueden agregarse *agentes humectantes* para mejorar tanto las características humectantes del metal de aporte derretido como la acción capilar.

Es esencial que las superficies que se van a soldar estén limpias y libres de herrumbre, aceite y otros contaminantes con el fin de (a) tener una humectabilidad y distribución efectiva (esparcimiento) del metal de aporte fundido en las interfases de la unión y (b) desarrollar la máxima resistencia de la adhesión. También puede usarse el arenado (sección 26.8) para mejorar el acabado de la superficie de las superficies de unión. Debido a que son corrosivos, los fundentes deben eliminarse después de hacer la soldadura fuerte, lo que se suele realizar lavando con agua caliente.

Resistencia de la unión con soldadura fuerte. La resistencia de la unión soldada depende de (a) la limpieza del espacio libre; (b) el área de unión y (c) la naturaleza de la unión en las interfases entre los componentes y el metal de aporte. Por lo común las holguras de la unión están en el rango de 0.025 a 0.2 mm (0.001 a 0.008 pulg). Como se ve en la figura 32.4, cuanto más estrecho es el espacio, mayor es la *resistencia cortante* de la unión. Observe que hay un espacio óptimo para lograr la máxima *resistencia a la tensión*. La resistencia cortante puede alcanzar 800 MPa (120 ksi) utilizando aleaciones que contengan plata (*soldadura de plata*). Debido a que las holguras en la soldadura fuerte son muy pequeñas, la rugosidad de las superficies que se empalman se vuelve importante (vea también la sección 33.3).

32.2.1 Métodos de la soldadura fuerte

Como se describe más adelante, los métodos de calentamiento usados en la soldadura fuerte identifican los diferentes procesos.

Soldadura fuerte con soplete. La fuente de calor en la *soldadura fuerte con soplete* (TB, por sus siglas en inglés) es gas oxcombustible con flama carburizante (vea la figura 30.1c). La soldadura se efectúa calentando primero la unión con el soplete para luego depositar la barra o alambre de soldadura en la unión. Los espesores de la parte por lo general van de 0.25 a 6 mm (0.01 a 0.25 pulg). La soldadura fuerte con soplete es difícil de controlar y requiere mano de obra especializada, pero se puede automatizar como proceso de producción con el uso de sopletes múltiples.

Soldadura fuerte en horno. En la *soldadura fuerte en horno* (FB, por sus siglas en inglés), primero se limpian y precargan las partes con el metal para soldar, en las configuraciones adecuadas; después se coloca el conjunto en un horno, donde se calienta de manera uniforme. Los hornos pueden ser por lotes, para formas complejas, o del tipo continuo para producciones grandes, en especial de partes pequeñas con diseños de unión sencillos. Los hornos al vacío o con atmósferas neutras se utilizan para metales que reaccionan con el ambiente; se puede usar hidrógeno para reducir los óxidos en metales a los que no les afecta la fragilización por hidrógeno (sección 2.10.2A). No se requiere que la mano de obra sea especializada y se pueden elaborar formas complejas ya que todo el ensamble se calienta de manera uniforme en el horno.

Soldadura fuerte por inducción. En la *soldadura fuerte por inducción* (IB, por sus siglas en inglés), la fuente de calor es el calentamiento por inducción de una corriente alterna de alta frecuencia. Las partes se cargan con el metal de aporte y se colocan cerca de bobinas de inducción para su calentamiento rápido (vea la figura 4.24). A menos que se utilice una atmósfera protectora (neutra), por lo general se requieren fundentes. Los espesores de la parte suelen ser menores que 3 mm (0.125 pulg). La soldadura fuerte por inducción es apropiada en particular para la soldadura continua de las partes (figura 32.5).

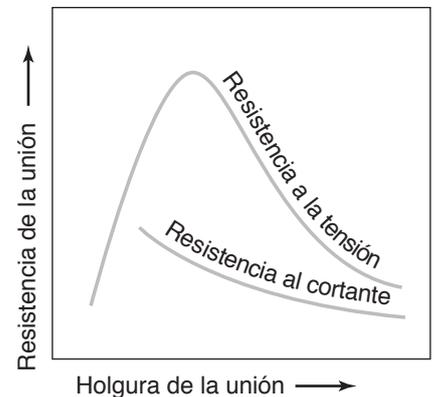


FIGURA 32.4 Efecto de la holgura de la unión, en la resistencia de las uniones con soldadura fuerte, a la tensión y al cortante; observe el lector que, a diferencia de la resistencia a la tensión, la correspondiente al cortante disminuye de manera constante a medida que el claro aumenta.

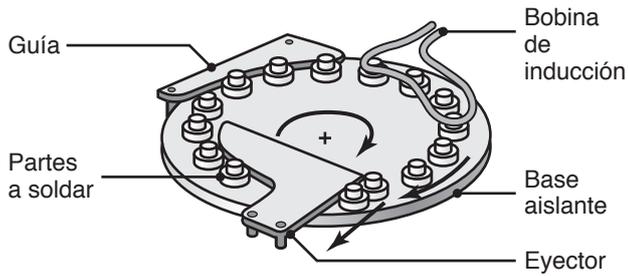


FIGURA 32.5 Ilustración esquemática de un arreglo continuo de soldadura fuerte por inducción para incrementar la productividad.

Soldadura fuerte con resistencia. En la *soldadura fuerte con resistencia* (RB, por sus siglas en inglés), la fuente de calor es la resistencia eléctrica de los componentes que se han de soldar; con este método se utilizan electrodos, como en la soldadura por fusión con resistencia. Partes con espesores comunes de 0.1 a 12 mm (0.004 a 0.5 pulg) se precargan con el metal de aporte, o bien éste se suministra externamente durante la soldadura. La operación es rápida, las zonas de calentamiento pueden confinarse a áreas muy pequeñas y es posible automatizar el proceso para producir una unión confiable, uniforme y de calidad.

Soldadura fuerte por inmersión. En la *soldadura fuerte por inmersión* (DB, por sus siglas en inglés), se une un ensamble

de dos o más partes sumergiéndolo en un baño de metal de aporte o de sal derretida; en este caso, el metal de aporte necesita ser parte del ensamble. La sal fundida actúa como un fundente, de modo que la unión tiene lugar sobre las superficies libres de óxido. El baño de metal de aporte o de sal fundida (sección 4.12) se encuentra a una temperatura apenas por arriba del punto de fusión del metal de aporte, de modo que todas las superficies de los componentes quedan recubiertas con el metal de aporte. En consecuencia, la soldadura fuerte por inmersión en baños de metal por lo general se usa para partes pequeñas (como lámina, alambre y accesorios), a menudo con menos de 5 mm (0.2 pulg) de espesor o diámetro.

En función del tamaño de las partes y del baño, es posible producir hasta 1000 uniones de una sola vez. La soldadura fuerte por inmersión en general requiere partes que sean autoajustables (autoensamblables), pero puede usarse soldadura por puntos o de precisión; son preferibles las uniones traslapadas, aunque también pueden producirse uniones a tope.

Soldadura fuerte infrarroja. En la *soldadura fuerte infrarroja* (IRB, por sus siglas en inglés), la fuente de calor es una lámpara de cuarzo de alta intensidad. La energía radiante se centra en la unión y la soldadura puede efectuarse en el vacío. También se emplea el calentamiento con microondas. El proceso es apropiado en particular para soldar componentes muy delgados, por lo general con menos de 1 mm (0.04 pulg) de espesor, inclusive estructuras metálicas tipo panal (sección 16.3).

Soldadura fuerte por difusión. La *soldadura fuerte por difusión* (DFB, por sus siglas en inglés) se realiza en un horno en el que, con el control apropiado de la temperatura y el tiempo, el metal de aporte se difunde en las superficies empalmadas de los componentes a unir. El tiempo requerido para la soldadura fuerte varía de 30 minutos a 24 horas. Este proceso se usa para uniones traslapadas o a tope fuertes, así como para materiales difíciles de unir, pero usualmente para aleaciones simples binarias o de tres metales. Las aleaciones más complejas pueden producir compuestos intermetálicos en la unión que pueden comprometer su resistencia. Debido a que la velocidad de difusión en la interfase no depende del espesor de los componentes, los espesores de la parte varían desde el del papel (foil) hasta 50 mm (2 pulg).

Haces de alta energía. Para aplicaciones especializadas y de alta precisión, y con metales y aleaciones de alta temperatura, puede usarse el calentamiento por *haz de electrones* o *rayo láser*, como se describe en las secciones 27.6 y 27.7.

Soldadura metalúrgica fuerte. La unión en la *soldadura metalúrgica fuerte* se prepara igual que en la soldadura por fusión, descrita en el capítulo 30. Si bien se usa un soplete de oxiacetileno con flama oxidante, el metal de aporte se deposita en la unión (de ahí el término soldadura) en vez de hacerlo por acción capilar. Como resultado, se usa considerablemente más metal de aporte que en la soldadura fuerte. Las temperaturas en la soldadura fuerte por lo general son menores que las usadas para la soldadura por fusión, por lo que la distorsión de la parte es mínima. En este proceso resulta esencial el uso de un fundente. El uso principal de la soldadura metalúrgica fuerte es para el mantenimiento y reparaciones de fundiciones de hierro y componentes de acero, aunque el proceso se puede automatizar para la producción en masa.

32.2.2 Diseño para la soldadura fuerte

Como en todos los procesos de unión, en la soldadura fuerte es importante el *diseño de la unión*; en la figura 32.6 se dan algunos lineamientos para ello. Las uniones resistentes en la soldadura fuerte requieren un área de contacto más grande que en la metalúrgica. Para mantener las partes juntas durante la soldadura fuerte, pueden requerirse diversos accesorios especiales y dispositivos para sujetarlas (vea también la sección 37.8); algunas permitirán la expansión y contracción térmicas durante la operación de soldadura fuerte.

32.3 Soldadura blanda

En la *soldadura blanda*, el metal de aporte (soldadura de bajo punto de fusión) se funde a una temperatura relativamente baja. Igual que en la soldadura fuerte, la soldadura rellena la unión, por acción capilar, entre los componentes que se ajustan estrechamente o están situados muy cerca. Las fuentes de calor para la soldadura blanda por lo general son caudines, sopletes u hornos. La palabra “solder”, en su nativo inglés, se deriva del latín *solidare*, que significa “hacerse sólido”. La soldadura blanda con aleaciones base cobre-oro y estaño-plomo fue la primera que se practicó hacia los años 4000 o 3000 a. C.

32.3.1 Tipos de soldaduras blandas y fundentes

Dos características importantes de las soldaduras son su baja tensión superficial y su alta capacidad de humectar. Las soldaduras blandas se funden en el *punto eutéctico* de la aleación de la soldadura (para un ejemplo, vea la figura 4.8). Tradicionalmente, las soldaduras blandas han sido de estaño-plomo en diferentes proporciones. Por ejemplo, una soldadura blanda cuya composición sea 61.9% estaño y 38.1% plomo, se funde a 188 °C (370 °F), mientras que el estaño se funde a 232 °C (450 °F) y el plomo a 327 °C (621 °F). Para aplicaciones especiales y mayor resistencia de la unión, en especial a temperaturas elevadas, otras composiciones posibles para la soldadura blanda son las aleaciones de estaño-zinc, plomo-plata, cadmio-plata y zinc-aluminio (tabla 32.2).

Debido a la *toxicidad* del plomo y sus efectos adversos en el ambiente, existen **soldaduras blandas libres de plomo**. Desde que la Unión Europea prohibió en 2006 la adición intencional de plomo a la electrónica del consumidor, se ha hecho amplio uso de soldaduras blandas de estaño-plata-cobre, con una composición común de 96.5% estaño, 3.0% plata y 0.5% cobre. Es frecuente que se agregue un cuarto elemento, como zinc o manganeso, con el fin de proveer las características mecánicas o térmicas deseadas. Para aplicaciones no eléctricas existe un gran número de soldaduras blandas y también se pueden incorporar cadmio, oro, bismuto e indio.

Los **fundentes** se usan en la soldadura blanda con los mismos propósitos que tienen en la soldadura metalúrgica y en la soldadura fuerte, como se describe en la sección 32.2, e inclusive sirven para ayudar al humedecimiento de las superficies por parte de la soldadura blanda. Por lo general los fundentes para la soldadura blanda son de dos tipos:

1. *Ácidos o sales inorgánicas*, como soluciones de zinc-amonio-cloruro, que limpian la superficie con rapidez. Para evitar la corrosión deben retirarse los residuos del fundente después de hacer la soldadura blanda lavando la unión muy bien con agua.
2. *Fundentes basados en resina* no corrosivos, de uso común en aplicaciones eléctricas.

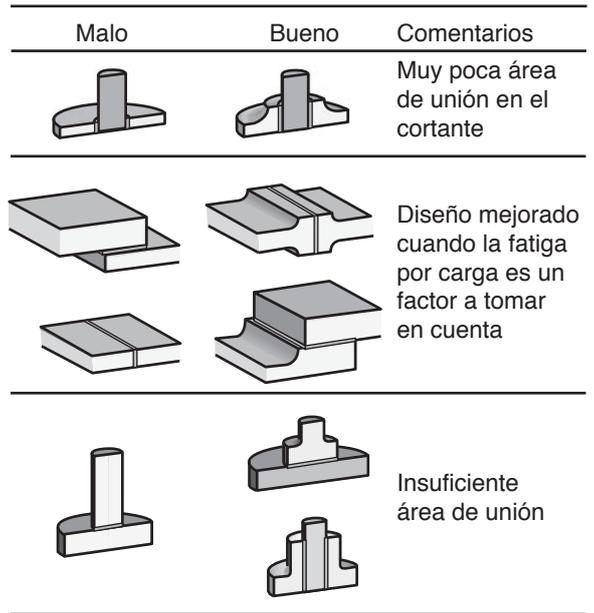


FIGURA 32.6 Ejemplos de diseños buenos y malos para la soldadura fuerte. *Fuente:* American Welding Society.

TABLA 32.2

Selección de soldaduras blandas comunes y sus aplicaciones más frecuentes	
Estaño-plomo	Propósito general
Estaño-zinc	Aluminio
Plomo-plata	Resistente a temperaturas superiores a la del ambiente
Cadmio-plata	Resistente a altas temperaturas
Zinc-aluminio	Aluminio, resistencia a la corrosión
Estaño-plata	Electrónica
Estaño-bismuto	Electrónica

32.3.2 Técnicas de soldadura blanda

Las técnicas de soldadura blanda más comunes son las siguientes:

1. Soldadura blanda con soplete (TS*)
2. Soldadura blanda en horno (FS*)
3. Soldadura blanda con caudín (INS*)
4. Soldadura blanda por inducción (IS*)
5. Soldadura blanda con resistencia (RS*)
6. Soldadura blanda por inmersión (DS*)
7. Soldadura blanda infrarroja (IRS*)

Otras técnicas de soldadura, para aplicaciones especiales, son:

8. **Soldadura blanda ultrasónica:** un transductor somete la soldadura blanda fundida a cavitación ultrasónica; esta acción remueve las películas de óxido de las superficies que se han de unir y se elimina así la necesidad de un fundente (de ahí proviene el término soldadura sin fundente).
9. **Soldadura blanda por reflujo (pasta) (RS*)**
10. **Soldadura blanda ondulatoria (WS*)**

* Por sus siglas en inglés.

Las dos últimas técnicas se utilizan mucho para la unión y empaquetamiento en la *tecnología de montaje en superficies*, (consulte la sección 28.11, en inglés en el sitio web). Debido a que son muy diferentes de los otros métodos de soldadura, se describen a continuación con algún detalle.

Soldadura blanda por reflujo. Las *pastas para soldar* son partículas que sueldan metal y que se mantienen unidas por medio de agentes fundentes, aglutinantes y humidificadores. Las pastas tienen consistencia semisólida y mucha viscosidad, por lo que son capaces de mantener su forma por periodos relativamente largos. La pasta se coloca directamente sobre la unión o en objetos planos para lograr un detalle más fino; se puede aplicar con la técnica de *plantilla o estarcido* (esténcil), como se ilustra en la figura 32.7a. Es común usar el estarcido durante la colocación de componentes eléctricos en tarjetas de circuitos impresos. Un beneficio adicional de la soldadura blanda por reflujo es que la alta tensión superficial de la pasta ayuda a mantener los paquetes montados en la superficie alineados sobre sus almohadillas, característica que mejora la confiabilidad de las uniones soldadas (consulte la sección 28.11, en inglés, en el sitio web del libro).

Una vez colocada la pasta y que se ha ensamblado la unión, se calienta en un horno y la soldadura se efectúa. En la soldadura blanda por reflujo, el producto se calienta en forma controlada de modo que ocurre la siguiente secuencia de eventos:

1. Se evaporan los solventes presentes en la pasta.
2. El fundente que hay en la pasta se activa y sucede la acción fundente.
3. Se precalientan los componentes.
4. Las partículas de soldadura blanda se derriten y empapan la unión.
5. El ensamble se enfría despacio con el fin de impedir el choque térmico y la posible fractura de la unión.

Aunque este proceso parece fácil, en cada etapa hay algunas variables y debe mantenerse un buen control de las temperaturas y duraciones para garantizar una resistencia apropiada de la unión.

Soldadura ondulatoria. La *soldadura ondulatoria* es una técnica común para fijar componentes de circuitos en sus tarjetas (consulte la sección 28.11 en el sitio web del libro). Aunque este proceso está siendo reemplazado poco a poco por la soldadura blanda con reflujo, todavía se utiliza en la práctica industrial.

Es importante observar que debido a que la soldadura blanda fundida no humedece todas las superficies, no se adherirá a la mayoría de polímeros y es fácil de quitar mientras está derretida. La soldadura empapa las superficies metálicas y forma una buena unión, pero sólo cuando el metal se precalienta a cierta temperatura. Así, la soldadura blanda ondulatoria requiere operaciones de flujo y precalentamiento por separado para poder efectuarse.

En la figura 32.7b se ilustra una operación de soldadura blanda ondulatoria. Primero se genera con una bomba una onda estacionaria laminar de soldadura blanda fundida;

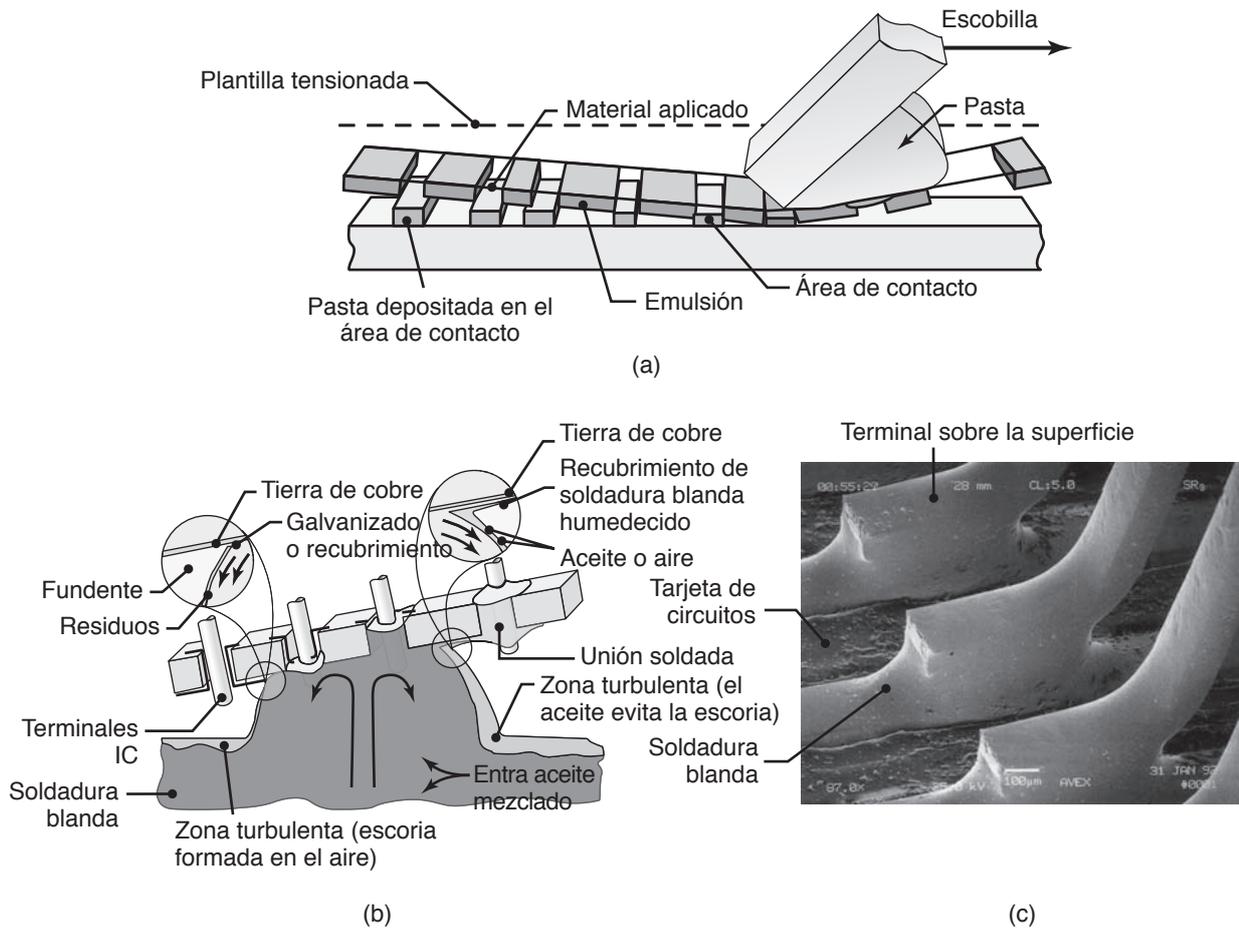


FIGURA 32.7 (a) Depósito usando plantilla de la pasta de soldadura blanda en una tarjeta de circuitos impresos en la soldadura por reflujo. (b) Ilustración esquemática del proceso de soldadura ondulatoria. (c) Imagen tomada con un microscopio electrónico de barrido (SEM) de una unión hecha con soldadura ondulatoria sobre un dispositivo de montaje en superficies. *Fuente:* (a) Tomado de V. Solberg.

después se introducen a la onda las tarjetas precalentadas y con fundente. La soldadura blanda empapa las superficies metálicas expuestas, pero (a) no permanece adherida en el empaque de polímero de los circuitos integrados y (b) no se adhiere a las tarjetas de circuitos recubiertas con polímero. Un cuchillo de aire (corriente de aire caliente de alta velocidad; vea la sección 34.11) elimina el exceso de soldadura blanda de la unión para impedir que se formen puentes entre terminales adyacentes.

Cuando se usa soldadura blanda ondulatoria para los paquetes de montaje superficial, deben adherirse a la tarjeta de circuitos antes de comenzar el proceso. Usualmente la unión se efectúa con la secuencia siguiente: (1) se aplica con plantilla o por estarcido resina epóxica en las tarjetas; (2) se colocan los componentes en las ubicaciones apropiadas; (3) se cura la resina epóxica; (4) se invierte la tarjeta y (5) se realiza la soldadura blanda ondulatoria. En la figura 32.7c se presenta una fotografía tomada con un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) de una unión común de un montaje en una superficie.

EJEMPLO 32.1 Soldadura blanda de componentes en una tarjeta de circuitos impresos

Las industrias de computación y electrónica de consumo establecen requerimientos estrictos en extremo para los componentes electrónicos. Se espera que los circui-

tos integrados y otros equipos electrónicos funcionen de manera confiable durante periodos muy largos durante los cuales estarán sujetos a variaciones significativas

de temperatura y a vibraciones (vea también la sección 28.12 en el sitio web del libro). Con estos requerimientos en mente, es esencial que las uniones soldadas sean suficientemente fuertes y confiables y también que las uniones se efectúen con rapidez extrema por medio de equipo automatizado.

En las industrias de la computación y electrónica de consumo hay una tendencia permanente hacia la reducción del tamaño de los chips y hacia la compactación creciente de las tarjetas de circuitos. Se obtienen ahorros de espacio con el montaje de circuitos integrados en paquetes de montaje superficial, lo que permite mayor compactación en una tarjeta. Más importante aún es el hecho de que la técnica permite que los componentes se monten en *ambos* lados de la tarjeta.

Surge un problema difícil cuando la misma tarjeta impresa tiene circuitos montados tanto en la superficie como en línea y resulta esencial soldar todas las uniones con un proceso automático y confiable. Es importante reconocer que para que la operación de ensamblado sea eficiente todos los circuitos en línea deben ser insertados desde un lado de la tarjeta. En realidad ninguna otra necesidad de rendimiento dictaría otra cosa y esta restricción simplifica en gran manera la manufactura.

Las etapas básicas de la soldadura blanda de las conexiones en una tarjeta como la descrita son las siguientes (vea las figuras 32.7b y c):

1. Aplicar soldadura blanda en un lado de la tarjeta.
2. Colocar los paquetes de montaje superficial sobre la tarjeta e insertar los paquetes en línea a través del lado principal de la tarjeta.
3. Usar soldadura blanda con reflujo.
4. Aplicar adhesivo al lado secundario de la tarjeta.

5. Con el adhesivo, fijar las partes de montaje en la superficie sobre el lado secundario de la tarjeta.
6. Curar el adhesivo.
7. Efectuar una operación de soldadura blanda ondulatoria sobre el lado secundario con el fin de producir la fijación eléctrica en la tarjeta de los circuitos montados en la superficie y en línea.

La aplicación de la soldadura blanda se lleva a cabo con plantillas o estenciles, de manera que la pasta de soldadura se aplique sólo en las áreas designadas de la tarjeta de circuitos (las plantillas se utilizan más para partes muy finas, ya que producen un espesor más uniforme de la pasta). Luego se colocan los componentes de los circuitos montados en la superficie y la tarjeta se calienta en un horno a unos 200 °C (400 °F) para que haya reflujo de la soldadura blanda, y para formar conexiones fuertes entre el montaje en la superficie y la tarjeta de circuitos.

En esta etapa, los componentes con terminales se insertan en el lado principal de la tarjeta, se aboquillan sus puntas y se voltea la tarjeta. Se imprime sobre la tarjeta un punto de resina epóxica en el centro de un componente del montaje en la superficie. Después se colocan los paquetes para montar en superficies sobre el adhesivo por medio de sistemas de alta velocidad, automatizados y controlados por computadora. Entonces se cura el adhesivo, se voltea la tarjeta y se realiza la soldadura blanda ondulatoria.

La operación de soldadura blanda ondulatoria une simultáneamente los componentes de montaje en la superficie con el lado secundario y suelda los extremos de los componentes en línea del lado principal de la tarjeta. Posteriormente, ésta se limpia e inspecciona antes de efectuar los controles de calidad.

32.3.3 Soldabilidad

La *soldabilidad* de la soldadura blanda se define de forma parecida a la soldabilidad metalúrgica (sección 30.9.2). Se han desarrollado fundentes especiales para mejorar la soldabilidad de metales y aleaciones. Como guía general se debe tener presente lo siguiente:

- *Cobre, plata y oro* son fáciles de unir con soldadura blanda.
- *Hierro y níquel* son más difíciles de unir con soldadura blanda.
- *Aluminio y aceros inoxidable* son difíciles de unir con soldadura blanda.
- *Aceros, fundiciones de hierro, titanio y magnesio*, así como *cerámicos y grafito*, se pueden soldar recubriéndolos antes con elementos metálicos apropiados con el fin de inducir la unión interfásial; este método es semejante al que se usa para unir carburos y cerámicas (vea la sección 32.6.3). Un ejemplo es la *hojalata* (material de uso común en la fabricación de latas para alimentos y que es una hoja de acero recubierta con estaño, lo que lo hace muy fácil de soldar).

32.3.4 Aplicaciones de la soldadura blanda y lineamientos de diseño

La soldadura blanda se usa mucho en la industria electrónica; sin embargo, observe que debido a que las temperaturas son relativamente bajas, una unión soldada tiene utilidad

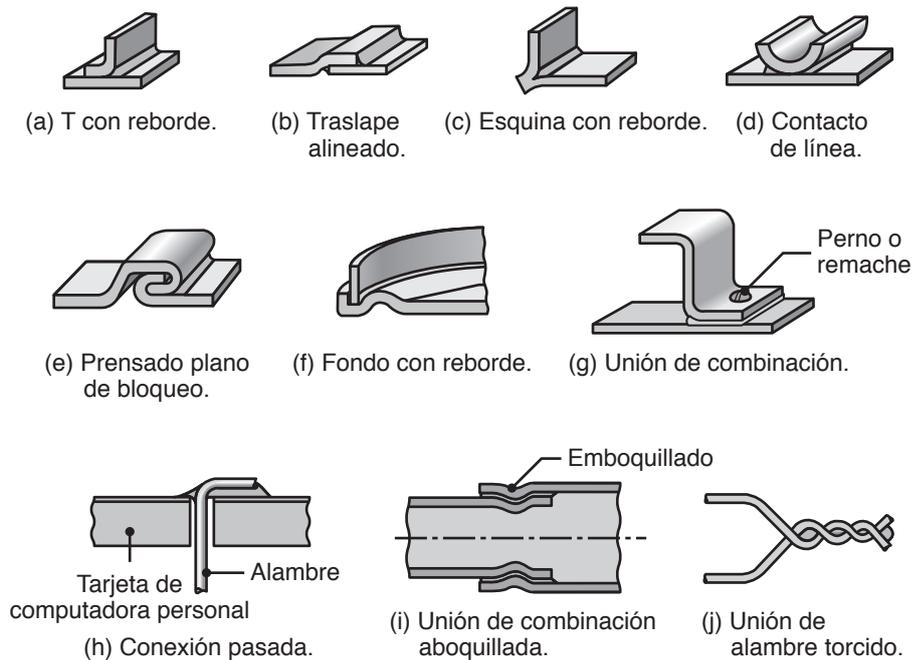


FIGURA 32.8 Diseños de unión comúnmente usados para soldadura blanda.

muy limitada a temperaturas elevadas. Además, como por lo general no tienen mucha resistencia, las soldaduras blandas no se pueden usar para miembros (estructurales) de carga. La resistencia de la unión puede mejorar significativamente con el *aseguramiento* mecánico de la unión, como se ilustra en la figura 32.8.

Los **lineamientos de diseño** para usar soldadura blanda son parecidos a los que se emplean para unir con soldadura fuerte (vea la sección 32.2.2). En la figura 32.8 se muestran algunos diseños de uniones que se usan con frecuencia. Observe la importancia de las grandes superficies de contacto (debido a la poca resistencia de las soldaduras blandas) para desarrollar suficiente fuerza de la unión en los productos unidos con soldadura blanda. Como las superficies que se empalman por lo general son pequeñas, es raro usar soldaduras blandas para hacer uniones a tope.

32.4 Unión adhesiva

Uno de los procesos de unión más versátiles es el uso de **adhesivos** entre dos superficies, por lo general con el uso de un caucho o polímero como material de aporte. Un ejemplo común de *unión adhesiva* es el fibracel, en el cual varias capas de madera se adhieren con pegamento para madera. El fibracel moderno se desarrolló en 1905, pero la práctica de unión adhesiva de tablas, con el uso de pegamento animal, se remonta a unos 3500 años a. C.

El enlace adhesivo ha ganado mucha aceptación en la manufactura desde que se usó por primera vez a gran escala: el ensamble de componentes de carga en aviones durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945). Los adhesivos existen en varias formas: líquidos, pasta, solución, emulsión, polvo, cinta y película. Cuando se aplican, es común que tengan un espesor de 0.1 mm (0.004 pulg).

Para cumplir los requerimientos de una aplicación en particular, un adhesivo requiere una o más de las propiedades siguientes (tabla 32.3):

- Resistencia: cortante y al desprendimiento.
- Tenacidad.
- Resistencia a varios fluidos y productos químicos.



Código QR 32.1 Procesamiento de una unión adhesiva. (Fuente: Cortesía de EWI).

TABLA 32.3

Propiedades y características comunes de adhesivos estructurales químicamente reactivos					
	Epóxico	Poliuretano	Acrílico modificado	Cianoacrilato	Anaeróbico
Resistencia al impacto	Malo	Excelente	Buena	Malo	Suave
Resistencia cortante a tensión, MPa (10 ³ psi)	15-22 (2.2-3.2)	12-20 (1.7-2.9)	20-30 (2.9-4.3)	18.9 (2.7)	17.5 (2.5)
Resistencia al desprendimiento (o pelado),* N/m (lb/pulg)	<523 (3)	14 000 (80)	5250 (30)	<525 (3)	1750 (10)
Sustratos unidos	La mayoría	La mayoría suave, no porosos	La mayoría suave, no porosos	La mayor parte de metales o plásticos no porosos	Metales, vidrio, termofijos
Rango de la temperatura de servicio, °C (°F)	-55 a 120 (-70 a 250)	-40 a 90 (-250 a 175)	-70 a 120 (-100 a 250)	-55 a 80 (-70 a 175)	-55 a 150 (-70 a 300)
Se requiere calor para el curado o el mezclado	Sí	Sí	No	No	No
Resistencia a los solventes	Excelente	Buena	Buena	Buena	Excelente
Resistencia a la humedad	De buena a excelente	Suave	Buena	Malo	Buena
Límite de la holgura, mm (pulg)	Ninguna	Ninguna	0.5 (0.02)	0.25 (0.01)	0.60 (0.025)
Olor	Suave	Suave	Fuerte	Moderada	Suave
Toxicidad	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Baja
Inflamabilidad	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja

*La resistencia al desprendimiento varía mucho, en función de la preparación y calidad de la superficie.

- Resistencia a la degradación ambiental, inclusive al calor y la humedad.
- Capacidad de humedecer las superficies por unir.

32.4.1 Tipos de adhesivos y sistemas adhesivos

Existen varios tipos de adhesivos y otros están en desarrollo para dar buena resistencia a la unión, inclusive a la resistencia a la fatiga (tabla 32.4). Los tres tipos básicos de adhesivos son:

1. **Adhesivos naturales**, como almidón, harina de soya, productos animales y dextrina (sustancia pegajosa que se obtiene del almidón).
2. **Adhesivos inorgánicos**, como el silicato de sodio y el oxiclورو de magnesio.
3. **Adhesivos orgánicos sintéticos**, que pueden ser termoplásticos (de uso sobre todo para uniones estructurales).

Debido a su resistencia, los adhesivos orgánicos sintéticos son los más importantes en las operaciones de manufactura, en particular para aplicaciones de carga. Se clasifican como sigue:

- **Químicamente reactivos:** poliuretanos, silicones, epóxicos, cianoacrilatos, acrílicos modificados, fenoles y polimidas; también se incluyen anaeróbicos (que se curan en ausencia de oxígeno), como Loctite® para sujetadores roscados, vea también el caso de estudio 32.1.
- **Sensibles a la presión:** caucho natural, caucho estireno-butadieno, butil caucho, nitril caucho y poliácrlatos.
- **Fusión caliente:** termoplásticos (como los copolímeros etileno-vinil acetato, poliolefinos, poliamidas y poliéster) y elastómeros termoplásticos.
- **Fusión caliente reactiva:** forma de termoplástico, con una porción de termofijo (basado en la química del uretano), con mejores propiedades; también se conoce como pegamento caliente.
- **Evaporativos o por difusión:** vinilos, acrílicos, fenoles, poliuretanos, cauchos sintéticos y cauchos naturales.

TABLA 32.4

Características generales de los adhesivos		
Tipo	Comentarios	Aplicaciones
Acrílico	Termoplástico; preparación rápida; adhesión fuerte a temperatura ambiente; dos componentes; buen solvente; resistencia química y al impacto; vida de trabajo corta; oloroso; se requiere ventilación.	Fibra de vidrio y uniones de acero tipo emparedado, raquetas de tenis, partes metálicas y plásticos.
Anaeróbico	Termofijo; fácil de usar; curado lento; adhesiones a temperatura ambiente; el curado ocurre en ausencia de aire; no curará si hay adherentes en contacto con el aire; un componente; no es bueno en superficies permeables.	Partes de máquinas de ajuste fino, como ejes y poleas, tuercas y pernos y rodamientos y agujas.
Epóxico	Termofijo; uno o dos componentes; adhesión fuerte; el más fuerte de los adhesivos de ingeniería; gran resistencia a la tensión y poca al desprendimiento; resiste la humedad y las altas temperaturas; difícil de usar.	Metal, cerámica y partes de plástico rígido.
Cianoacrilato	Termoplástico; preparación rápida; adhesión fuerte a temperatura ambiente; fácil de usar; incoloro.	“Krazy Glue”; une la mayor parte de materiales; es útil en especial para cerámicos y plásticos.
Fusión caliente	Termoplástico; preparación rápida; uniones rígidas o flexibles; fácil de aplicar; quebradizo a temperaturas bajas; basado en etil vinil acetato, poliolefinos, poliamidas y poliésteres.	Pega la mayoría de materiales; empaques; encuadernación de libros y uniones de latas metálicas.
Sensible a la presión	Termoplástico; uniones con resistencia variable; primero se ancla el adhesivo a la cinta de respaldo del material —un agente de liberación en el reverso de la tela permite que se desenrolle; hecho de ésteres de poliacrilato y varios cauchos naturales y sintéticos.	Cintas, papel y etiquetas.
Fenólicos	Termofijo; curado en horno; unión fuerte; mucha resistencia a la tensión y poca al impacto; quebradizo; fácil de usar; curado por evaporación de un solvente.	Amortiguamiento acústico, para balatas y cojines de embrague, unión de grano abrasivo y estructuras tipo panel.
Silicón	Termofijo; cura lenta; flexible; uniones a temperatura ambiente; gran resistencia al impacto y al desprendimiento; parecido al caucho.	Taponos y selladores.
Formaldehído (urea, melamina, fenol, resorcinol)	Termofijo; fuerte con uniones de madera; la urea no es cara, está disponible como polvo o líquido y requiere un catalizador; la melamina es más cara, curado con calor y la unión es resistente al agua; el resorcinol forma una unión resistente al agua a temperatura ambiente. Los tipos se pueden combinar.	Uniones de madera, fibracel y uniones.
Uretano	Termofijo; uniones a temperatura ambiente o curado en horno; buenas cualidades para llenar espacios.	Partes de fibra de vidrio de los cuerpos, caucho y tela.
Basado en agua (animal, vegetal, cauchos)	No es caro, no es tóxico ni inflamable.	Madera, papel, tela, piel y envolturas de sellado seco.

- **Película y cinta:** nailon, epóxicos, elastómeros epóxicos, nitril fenoles, vinil fenoles y poliamidas.
- **Adherencia retrasada:** copolímeros de estireno-butadieno, acetatos de polivinilo, poliésteres y poliamidas.
- **Conductores eléctricos y térmicos:** epóxicos, poliuretanos, silicones y poliamidas. La conductividad eléctrica se obtiene por adición de rellenos como la plata (la de uso más común), cobre, aluminio y oro. Los rellenos que mejoran la conductividad eléctrica de los adhesivos por lo general también mejoran su conductividad térmica.

Sistemas adhesivos. Estos sistemas se clasifican con base en sus características químicas específicas:

- **Sistemas basados en epóxicos:** estos sistemas tienen propiedades de alta resistencia y alta temperatura, de hasta 200 °C (400 °F); las aplicaciones comunes incluyen balatas para frenos automotrices y agentes adhesivos para moldes de arena para fundición.
- **Acrílicos:** debido a que el adhesivo actúa como solvente, los acrílicos son más tolerantes con los contaminantes superficiales.
- **Sistemas anaeróbicos:** el curado de estos adhesivos se hace en ausencia de oxígeno y la adhesión por lo general es fuerte y frágil; los tiempos de curado se pueden reducir por medio de calor o radiación ultravioleta (UV).
- **Cianoacrilato:** las líneas de unión son delgadas y la adhesión se fija en un lapso de cinco a 40 segundos.
- **Uretanos:** estos adhesivos tienen mucha tenacidad y flexibilidad a temperatura ambiente; se usan mucho como selladores.
- **Silicones:** muy resistentes a la humedad y solventes, estos adhesivos tienen gran resistencia al impacto y al desprendimiento; sin embargo, son comunes tiempos de curado en el rango de uno a cinco días.

Muchos de estos adhesivos se combinan para optimizar sus propiedades, como el *epóxico-silicón*, *nitril-fenol* y *epóxico-fenol*. Los adhesivos menos caros son los epóxicos y fenoles, seguidos por los poliuretanos, acrílicos, silicones y cianoacrilatos. Los adhesivos para aplicaciones de alta temperatura, en un rango cercano a 260 °C (500 °F), como las poliamidas y los polibenzimidazoles, por lo general son los más caros. La mayoría de adhesivos tienen una temperatura óptima alrededor de 200 °C para la máxima resistencia cortante.

32.4.2 Adhesivos conductores de la electricidad

Aunque la mayor parte de aplicaciones de unión con adhesivos requiere resistencia mecánica, un avance relativamente reciente es el desarrollo y aplicación de adhesivos conductores de la electricidad con el fin de sustituir las aleaciones base plomo, en particular en la industria electrónica. Estos adhesivos requieren temperaturas de curado o preparación menores que las necesarias para la soldadura blanda. Las aplicaciones de adhesivos conductores de la electricidad incluyen calculadoras, controles remotos y paneles de control. Además, hay usos de alta densidad en ensamblajes electrónicos, pantallas de cristal líquido, televisiones portátiles y juegos electrónicos.

En estos adhesivos el polímero es la matriz y contiene metales conductores (de relleno) en formas como hojuelas y partículas (vea también la sección 7.3 acerca de polímeros conductores de la electricidad). Hay una proporción mínima de rellenos necesarios para hacer que el adhesivo sea conductor eléctrico; por lo común en el rango de 40 a 70% del volumen.

El tamaño, la forma y distribución de las partículas metálicas, el método de calentamiento y aplicación de presión, así como la geometría del contacto de la partícula conductora individual pueden controlarse para dar al adhesivo conductividad isotrópica o anisotrópica. Los metales que se utilizan son por lo general plata, níquel, cobre y oro, así como carbono. Los desarrollos más recientes incluyen partículas de polímeros como poliestireno recubierto con películas delgadas metálicas de plata u oro. También se utiliza grafito como relleno, generalmente para producir un adhesivo conductor de la electricidad que sea no magnético y dé a la interfase electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés) aislamiento de los componentes electrónicos. En general, los materiales de la matriz son epóxicos, aunque también se emplean termoplásticos disponibles como película o pasta.

32.4.3 Preparación de la superficie, capacidades y aplicaciones del proceso

La *preparación de la superficie* es muy importante en la unión con adhesivos, ya que la resistencia de la unión depende en gran medida de la ausencia de suciedad, polvo, aceite y otros contaminantes. Esta dependencia se observa cuando se trata de aplicar una cinta adhesiva sobre una superficie sucia o aceitosa. Los contaminantes también afectan la capacidad de humedecimiento del adhesivo e impiden su distribución uniforme en la interfase. Las películas gruesas, débiles o dispersas de óxido sobre las superficies de la pieza de trabajo son perjudiciales para la adhesión. Por otra parte, puede ser deseable una película porosa o delgada y fuerte, particularmente una con cierta rugosidad superficial para mejorar la adhesión o para introducir un bloqueo mecánico. Sin embargo, la rugosidad no debe ser demasiado alta debido al aire contenido, en cuyo caso la resistencia de la unión disminuye. Hay varios compuestos y preparadores disponibles que modifican las superficies para mejorar la resistencia de la unión adhesiva. Pueden aplicarse adhesivos líquidos por medio de cepillos, rocío o rodillos.

Capacidades del proceso. Los adhesivos se pueden usar para unir una gran variedad de materiales metálicos y no metálicos semejantes o no, así como componentes de diferentes formas, tamaños y espesores. La unión adhesiva también se combina con métodos de unión mecánica (sección 32.5) para mejorar más la resistencia de la unión. El diseño de la unión y los métodos para hacerla requieren cuidado y habilidad. Por lo general se requiere equipo especial, como accesorios, prensas, herramientas y autoclaves, al igual que hornos para el curado.

La **inspección no destructiva** de la calidad y la resistencia de los componentes unidos con adhesivos puede ser difícil. Algunas de las técnicas descritas en la sección 36.10, como impacto acústico (golpeteo), holografía, detección infrarroja y pruebas ultrasónicas son métodos de prueba eficaces de las uniones adhesivas.

Prueba de adhesivos. Recuerde que los adhesivos tienen más éxito cuando soportan esfuerzos cortantes y menos éxito en otras condiciones de carga. Muchos adhesivos son débiles cuando se someten a esfuerzos de tensión. Con el reconocimiento de que las cargas son complejas, se ha usado un gran número de configuraciones de pruebas para evaluar los adhesivos en función de la aplicación particular y las tensiones encontradas (figura 32.9). Las pruebas en cantiléver afilado y cuña son útiles en particular para hacer evaluaciones de alta velocidad de deformación; las pruebas con cuña producen esfuerzos combinados, cortantes y normales cuando los dos miembros tienen espesores diferentes.

La prueba más común es la de desprendimiento, que se muestra en las figuras 32.9b y 32.10, que también ilustra las resistencias y limitaciones de los adhesivos. Observe, por ejemplo, lo fácil que es desprender cinta adhesiva de una superficie, pero es muy difícil deslizarla sobre ella. Durante el desprendimiento, el comportamiento de un adhesivo puede ser frágil o dúctil y tenaz, por lo que se requieren grandes fuerzas para arrancarlo de la superficie.

Aplicaciones. Las principales industrias que usan mucho la unión con adhesivos son la aeroespacial, automotriz, utensilios electrodomésticos y de productos para la construcción. Las aplicaciones incluyen ensamblajes para balatas de frenos automotrices, parabrisas de vidrio laminado, utensilios electrodomésticos, aspas de helicóptero, estructuras tipo panel y fuselajes y superficies de control de aviones.

Una consideración importante en el uso de adhesivos en la producción es el tiempo de curado, que varía



Código QR 32.2 Prueba de desprendimiento o pelado de un adhesivo. (Fuente: Cortesía de Instron®).

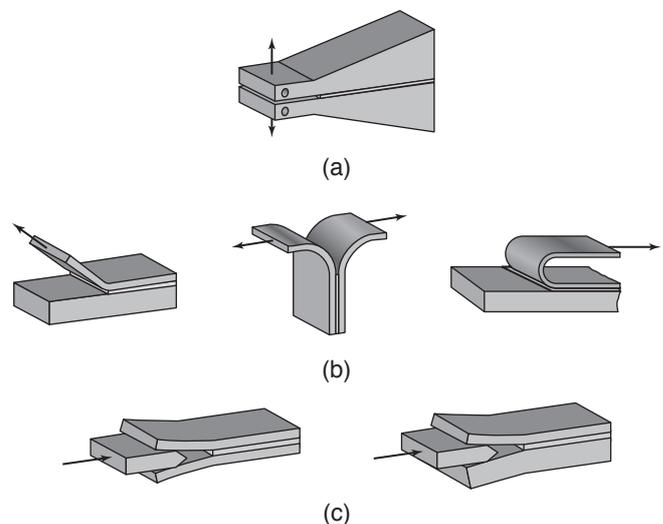


FIGURA 32.9 Arreglos comunes para evaluar adhesivos: (a) viga en cantiléver con doble cuña; (b) prueba de desprendimiento y (c) prueba de cuña.

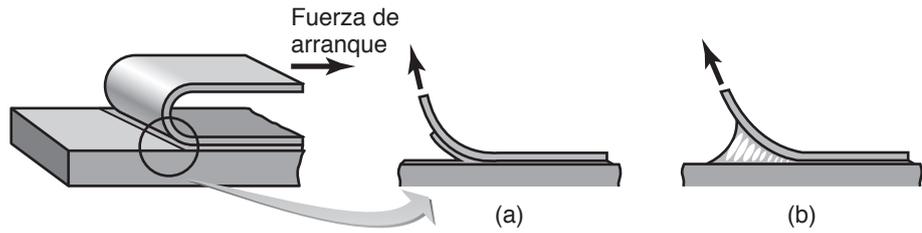


FIGURA 32.10 Comportamiento característico de adhesivos (a) frágiles y (b) resistentes en una prueba de desprendimiento; esta prueba es similar a arrancar cinta adhesiva de una superficie sólida.

de unos cuantos segundos (a altas temperaturas) a varias horas (a temperatura ambiente), en particular para adhesivos termofijos. Así, las tasas de producción son bajas en comparación con las de otros procesos de unión. Además, las uniones con adhesivos para aplicaciones estructurales rara vez son apropiadas para un servicio por arriba de los 250 °C (500 °F).

Las principales ventajas de la unión con adhesivos son las siguientes:

- La unión interfásica tiene suficiente resistencia para aplicaciones estructurales, pero también se usa con propósitos diferentes, como sellado, aislamiento, prevención de corrosión electroquímica entre metales disímiles y reducción de vibraciones y ruido (por medio del amortiguamiento interno de las uniones).
- La unión adhesiva distribuye la carga en la interfase, con lo que elimina esfuerzos localizados que por lo general se originan al unir los componentes con sujetadores mecánicos como pernos y tornillos. Además, se mantiene la integridad estructural de las secciones (porque no se requieren orificios).
- No se afecta el aspecto externo de los componentes unidos.
- Pueden unirse componentes muy delgados y frágiles sin que haya un incremento significativo del peso.
- Se pueden adherir materiales porosos y materiales de propiedades y tamaños muy diferentes.

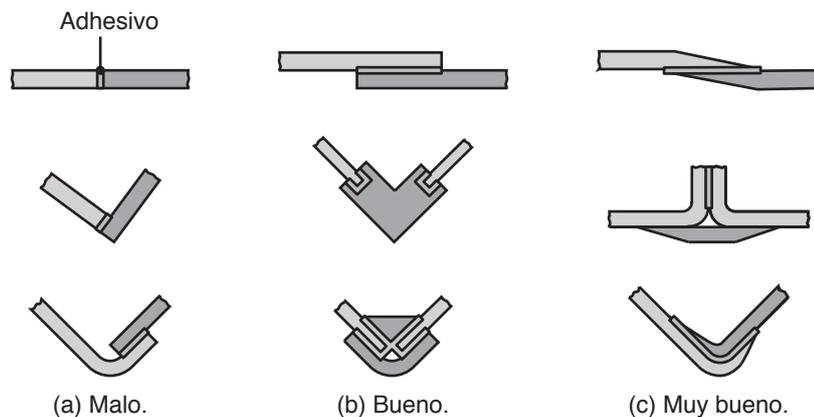


FIGURA 32.11 Diferentes diseños de la junta en la unión con adhesivos; note que los buenos diseños requieren grandes áreas de contacto entre los miembros por unir.

- Debido a que por lo general la adhesión se efectúa a una temperatura entre la del ambiente y alrededor de 200 °C (400 °F), no hay distorsión significativa de los componentes ni cambio de sus propiedades originales.

Las principales limitaciones de la unión con adhesivos son las siguientes:

- Rango limitado de las temperaturas de servicio.
- El tiempo de adhesión puede ser largo.
- Es necesario mucho cuidado en la preparación de la superficie.
- Las uniones pegadas son difíciles de probar de manera no destructiva, en particular las estructuras grandes.
- Confiabilidad limitada de las estructuras unidas con adhesivos durante su vida de servicio y preocupaciones importantes acerca de condiciones hostiles del ambiente, como degradación por temperatura, oxidación, corrosión-esfuerzo, radiación o disolución.

El costo de la unión con adhesivos depende de cada operación en particular. Sin embargo, en muchos casos la economía global del proceso hace que la unión con adhesivos resulte atractiva y, en ocasiones, puede ser el único proceso factible o práctico. El costo del equipamiento es muy variable y depende del tamaño y del tipo de operación.

32.4.4 Diseño para la unión con adhesivos

- En las figuras 32.11 a 32.13 se muestran varios diseños de uniones para pegar con adhesivos. Varían considerablemente en cuanto a resistencia; por ello es importante la selección del diseño apropiado y se deben incluir consideraciones como el tipo de carga y el ambiente.
- Los diseños deben garantizar que las uniones se sujeten de preferencia sólo a fuerzas de compresión o cortantes, aunque pueden soportar una tensión limitada. Deben evitarse el desprendimiento y el clivaje.
- Las uniones a tope requieren grandes superficies de unión; deben usarse uniones traslapadas (ahusadas) cuando sea factible. Las uniones con traslape sencillo tienden a distorsionarse cuando se sujetan a tensión debido al par de fuerzas presentes en la unión (vea la figura 31.9). Si esto es una preocupación deben emplearse uniones con traslape doble o en banda (figuras 32.12b y d).
- De preferencia, los coeficientes de dilatación térmica (tabla 3.1) de los componentes que se van a unir deben ser parecidos con el fin de evitar tensiones internas durante la adhesión. Deben evitarse situaciones en las cuales el ciclado térmico pueda causar movimiento diferencial a través de la unión.

32.5 Sujeción mecánica

Es posible que dos o más componentes se tengan que unir o sujetar de tal manera que se puedan separar durante la vida de servicio, o ciclo de vida, del producto. Numerosos productos como plumas, acoplamientos de ejes, ruedas de automóviles, utensilios electro-

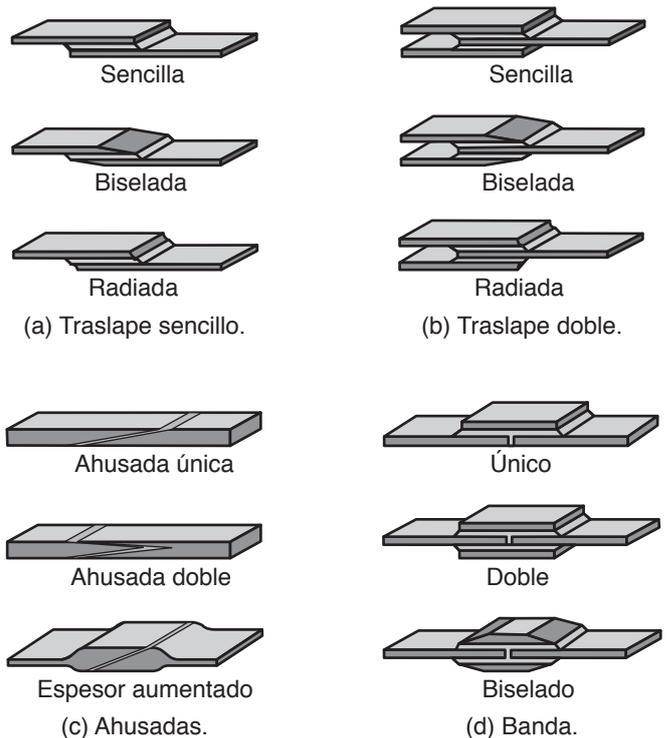


FIGURA 32.12 Configuraciones deseables para las uniones hechas con adhesivos.

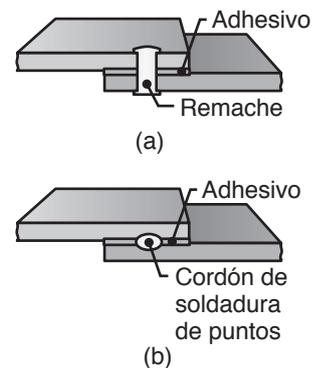


FIGURA 32.13 Dos ejemplos de combinación de uniones con fines de mejorar la resistencia, impedir el paso de aire o líquidos y resistencia a la corrosión por hendiduras (o en cavidades o por fisuras).

domésticos, motores y bicicletas tienen componentes que se sujetan mecánicamente. La *sujeción mecánica* es preferible sobre otros métodos por las siguientes razones:

- Su manufactura es fácil.
- Facilidad de ensamble y transportación.
- Hay facilidad para desensamblarlos, darles mantenimiento, reemplazar partes o repararlos.
- Es fácil crear diseños que requieran uniones móviles como bisagras, mecanismos deslizantes y componentes y accesorios ajustables.
- Disminuyen el costo total de manufactura del producto.

El método más común de sujeción mecánica es con el uso de **sujetadores**; que pueden ser pernos, remaches o llaves; *sujetadores roscados* como pernos roscados, tuercas, tornillos y armellas; o de otros tipos, como varios sujetadores integrados. La sujeción mecánica, también conocida como **ensamblaje mecánico**, por lo general requiere que los componentes tengan orificios a través de los cuales se insertan los sujetadores. Estas uniones pueden estar sujetas a esfuerzos tanto cortantes como de tensión, por lo que deben diseñarse para que resistan dichas fuerzas.

Preparación del orificio. Un aspecto importante de la sujeción mecánica es la *preparación del orificio*. Como se describió en los capítulos 16, 23 y 27, un orificio se puede producir con varios procesos, como punzonado, taladrado, medios químicos y eléctricos y haces de alta energía. Recuerde, de las partes II y III, que los orificios también se pueden *producir integralmente* en el producto durante procesos como fundición, forja, extrusión y metalurgia de polvos. Para mejorar la exactitud y el acabado de la superficie, muchas de estas operaciones de perforación pueden ser seguidas por procesos de terminado, tales como rasurado, desbarbado, escariado y asentado, descritos en diferentes secciones de la parte IV.

Debido a diferencias fundamentales en sus características, cada proceso de perforación produce orificios con acabado de la superficie, propiedades de ésta y exactitud dimensional diferentes. La influencia más significativa de un orificio en un cuerpo sólido es su tendencia a reducir la vida de fatiga del componente por las concentraciones de tensión. La vida de fatiga puede mejorarse induciendo esfuerzos residuales compresivos sobre la superficie del orificio en la dirección del aro. Estos esfuerzos se suelen inducir impulsando una barra cilíndrica (*perno de arrastre*) a través del orificio para expandirlo muy brevemente. Esta operación deforma plásticamente la superficie del orificio, de manera parecida al granallado o al bruñido por rodamiento (sección 34.2).

Sujetadores roscados. Los pernos, tornillos y armellas se encuentran entre los sujetadores roscados de uso más común. Las referencias bibliográficas incluidas al final de este capítulo describen numerosos estándares y especificaciones, inclusive dimensiones de la rosca, tolerancias en las dimensiones, cuerda, resistencia y calidad de los materiales que se utilizan en la elaboración de los sujetadores.

Los pernos se utilizan con orificios que atraviesan la pieza y dependen de una tuerca para desarrollar una carga; los tornillos emplean un orificio roscado o bien son *autorroscantes* (con lo que el tornillo corta o forma la rosca en la parte que se va a sujetar). El método de autorroscantes es particularmente eficaz y económico en productos de plástico en los cuales la sujeción no requiere un orificio perforado o una tuerca (vea también la sección 32.6). Si la unión va a estar sujeta a vibración, como en un avión, motores, maquinaria y utensilios electrodomésticos, existen varias tuercas y *arandelas elásticas* especialmente diseñadas. Éstas incrementan la resistencia de fricción en la dirección de la torsión, con lo que inhiben cualquier aflojamiento por vibración de los sujetadores.

Remaches. El método más común de unión mecánica permanente o semipermanente es con el empleo de *remaches* (vea la figura 32.14). En el ensamblaje de una aeronave comercial grande se usan cientos de miles de remaches. Éstos pueden ser sólidos o tubulares. La instalación de un remache sólido requiere de dos pasos: colocar el remache en el orificio (por lo general punzonado o taladrado) y deformar el extremo de su cuerpo mediante recalado (*cabeceado*; vea la figura 14.11). Cuando a un orificio sólo puede

accederse desde un lado se utiliza un *remache ciego*, el cual usa un remache tubular con un taquete interno. Cuando se inserta el remache, el taquete es empujado hacia el extremo de inserción y provoca una punta expansiva que bloquea al remache en el sitio, como se aprecia en la figura 32.14c. En la cavidad del remache pueden colocarse explosivos para que se expanda el remache al detonarlos.

La operación de remachar se puede efectuar manualmente o con medios mecanizados, inclusive con el uso de robots programables. En la figura 32.15 se ilustran algunos lineamientos para colocar remaches.

32.5.1 Varios métodos de sujeción

En las operaciones de unir y ensamblar se usan numerosas técnicas.

Cosido (grapas) y engrapado de metales. El proceso de *coser metales* y *engrapar metales* (figura 32.16) se parece mucho a engrapar papeles. La operación es rápida y apropiada en particular para unir materiales metálicos y no metálicos delgados, inclusive madera; un ejemplo común es el engrapado de contenedores de cartón. En el *prensado*, dos o más materiales se deforman plásticamente por medio de una prensa y un dado para producir una geometría de autobloqueo. El material sujetador debe ser lo suficientemente delgado y dúctil como para soportar la gran deformación localizada con aristas de 90°.

Cosido (engargolado). El *engargolado* (figura 32.17) se basa en el principio sencillo de plegar juntas dos piezas delgadas, en gran medida como cuando se unen dos piezas de papel doblándolas por las esquinas. Ejemplos comunes de engargolado son las tapas de las latas de bebidas (vea la figura 16.31), contenedores de alimentos y productos domésticos, así como ductos de calefacción y aire acondicionado. En el engargolado, los materiales deben ser capaces de soportar sin fracturarse la flexión y plegado con radios muy pequeños. El rendimiento y confiabilidad de los engargolados se puede mejorar agregando adhesivos o recubrimientos de polímeros y selladores, o con soldadura; estos métodos también los impermeabilizan.

Plegado o aboquillado. El proceso de *plegado* es un método de unión sin emplear sujetadores. Se puede realizar con gotas o por perforaciones (vea la figura 32.18), las cuales se pueden producir con emboquillado o recalado rotativo (vea la sección 14.4). El plegado se realiza en componentes tanto planos como tubulares (emboquillado), siempre y cuando los materiales sean lo bastante delgados y dúctiles como para soportar las

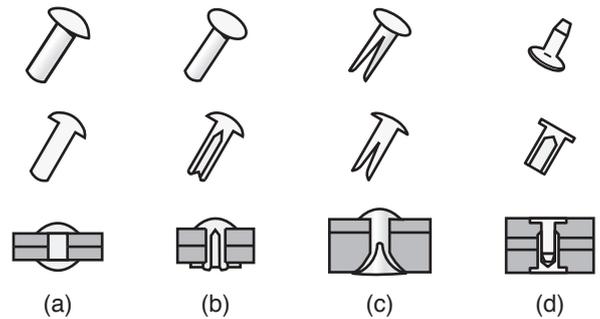


FIGURA 32.14 Ejemplos de remaches: (a) sólido, (b) tubular, (c) deslizante o bifurcado y (d) de compresión.

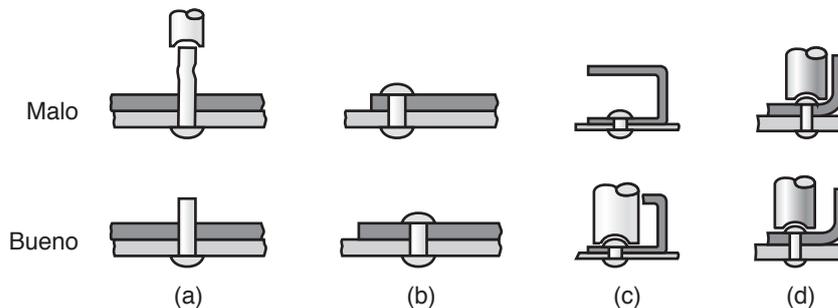


FIGURA 32.15 Lineamientos de diseño para remachar. (a) El tronco expuesto es muy largo; el resultado es que se pandea y no se bloquea. (b) Los remaches deben colocarse lo suficientemente lejos de las aristas de las partes con el fin de evitar concentraciones de esfuerzos. (c) Las secciones unidas deben permitir holguras grandes para las herramientas remachadoras. (d) La curvatura de la sección no debe interferir con el proceso de remachado. *Fuente:* Tomado de J. G. Bralla.

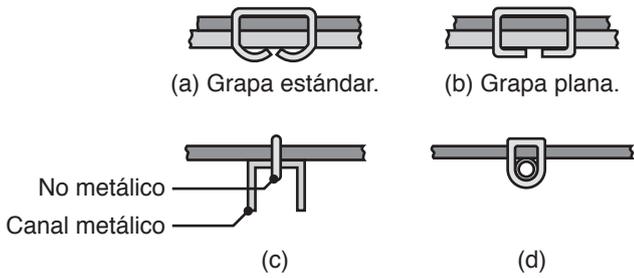


FIGURA 32.16 Ejemplos comunes de engrapado de metales.

grandes deformaciones localizadas. Las tapas metálicas se colocan en las botellas de vidrio por emboquillado, igual que ciertos conectores se emboquillan en cables eléctricos. Para obtener una unión fuerte, el emboquillado se puede ejecutar empleando una manga alrededor de las partes que se unirán.

Sujetadores de agarre o ajuste instantáneo (seguros y engarces). En la figura 32.19 se muestran varios tipos de *sujetadores de agarre y ajuste instantáneo*. Estos sujetadores se usan mucho en las carrocerías automotrices y aparatos domésticos; son económicos y permiten el ensamble fácil y rápido del componente. Los *sujetadores con seguro integrado* son cada vez más comunes debido a que son fáciles de ensamblar y se moldean al mismo tiempo que la parte que han de sujetar.

ajuste por presión se fuerza un componente sobre otro; cuando los componentes se diseñan adecuadamente, este proceso da como resultado una gran resistencia de la unión.

Ajustes por contracción y presión. Los componentes también se pueden ensamblar por medio de contracción o ajuste por presión. En el *ajuste por contracción* se calienta un componente de modo que se expanda y pueda montarse en un eje u otro componente; cuando se enfría, se contrae y desarrolla un gran esfuerzo de contacto. Las aplicaciones comunes son el ensamble de componentes y montaje de engranes, así como de levas en ejes. En el *ajuste por presión* se fuerza un componente sobre otro; cuando los componentes se diseñan adecuadamente, este proceso da como resultado una gran resistencia de la unión.

Aleaciones con memoria de la forma. Las características de estos materiales se describieron en la sección 6.13. Debido a su capacidad única de recuperación de su forma, las *aleaciones con memoria de la forma* se usan para sujetadores. Varias aplicaciones avanzadas incluyen su uso como acoplamientos en el ensamble de tubos de aleaciones de titanio para aviones.

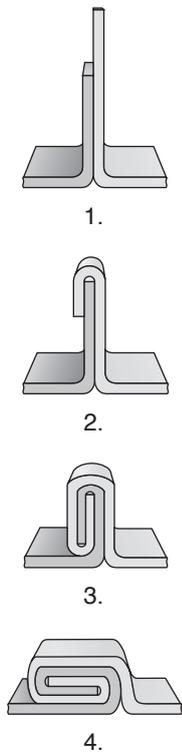


FIGURA 32.17 Etapas de la formación de un engarzado de doble seguro.

32.5.2 Diseño de la sujeción mecánica

El diseño de uniones mecánicas requiere una consideración del tipo de carga a que se sujetará la estructura y del tamaño y espaciamiento de los orificios. Entre los lineamientos generales de diseño para las uniones mecánicas están los siguientes (vea también la sección 37.10):

- Por lo general es menos costoso usar menos sujetadores, aunque más grandes, que usar una gran cantidad de sujetadores pequeños.
- El ensamble de las partes debería ser completado con el mínimo de sujetadores.
- El ajuste entre partes que se van a unir debe ser lo más flojo posible para facilitar el proceso de ensamblado y reducir costos.
 - Siempre que sea posible deben usarse sujetadores de tamaño estándar.
 - Los orificios no deben estar demasiado cerca de aristas o esquinas para evitar la posibilidad de que el material se desgarre cuando se le someta a fuerzas externas.

Es importante la *compatibilidad* del material del sujetador con el de los componentes por unir, pues de otro modo se produce *corrosión galvánica* (también conocida como *corrosión por hendiduras*; vea la sección 3.8). Por ejemplo, en un sistema en el que se use un perno o remache de acero para sujetar placas de cobre, el perno es el ánodo y la placa de cobre el cátodo; esta combinación causa una corrosión rápida y la pérdida de resistencia de la unión. Los sujetadores de aluminio o zinc en productos de cobre reaccionan de la misma manera.

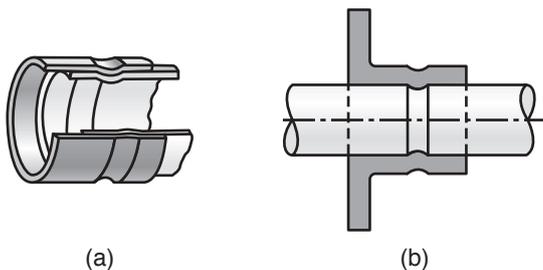


FIGURA 32.18 Dos ejemplos de unión mecánica por medio de plegado (emboquillado).

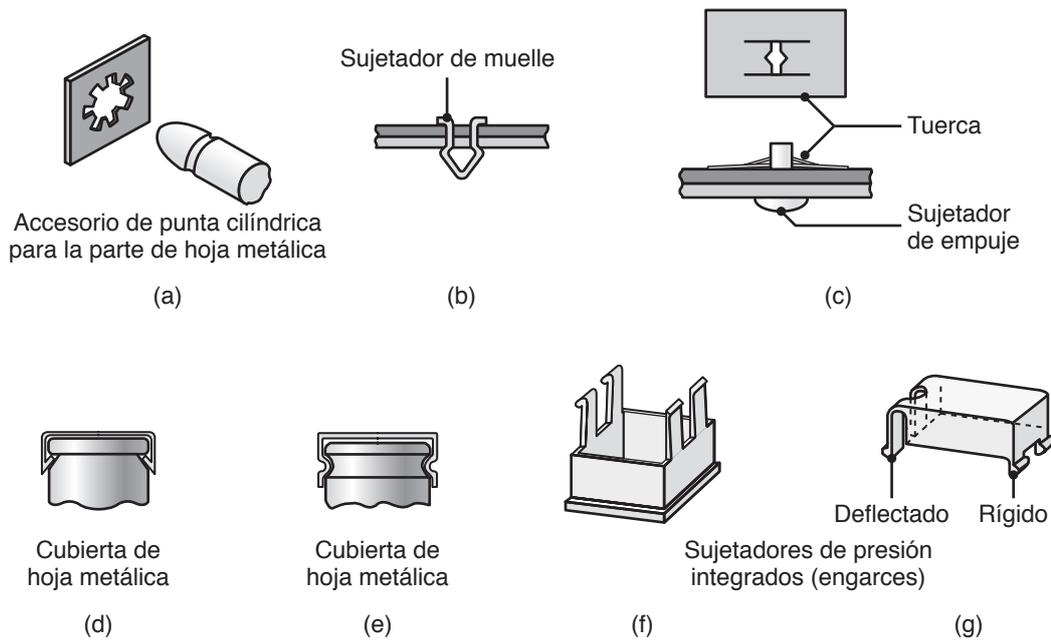


FIGURA 32.19 Ejemplos de sujetadores de agarre y ajuste instantáneo usados para facilitar el ensamblado.

32.6 Unión de plásticos, cerámicos y vidrios

Los plásticos se pueden unir con muchos de los métodos descritos para unir materiales metálicos y no metálicos, en especial con uniones adhesivas y sujeción mecánica.

32.6.1 Unión de termoplásticos

Los termoplásticos pueden unirse por medios térmicos, uniones adhesivas, unión con solventes y sujeción mecánica.

Métodos térmicos. Los termoplásticos (sección 7.3) se reblandecen y derriten a medida que la temperatura aumenta. En consecuencia, se pueden unir cuando se genera calor en la interfase (desde una fuente externa o interna), lo que permite que tenga lugar la **fusión**. El calor reblandece el termoplástico en la interfase hasta un estado fundido viscoso y se garantiza una buena unión con la aplicación de presión.

Sin embargo, por la baja conductividad térmica de los termoplásticos, la fuente de calor puede quemar o chamuscar las superficies de los componentes si se aplica a una tasa demasiado elevada. Esta quemadura puede causar entonces dificultades para desarrollar una fusión lo bastante profunda para obtener la resistencia adecuada de la unión. La *oxidación* también es un problema cuando se unen algunos polímeros, como el polietileno, ya que causa *degradación*; para impedir la oxidación y como protección se utiliza un gas inerte, como el nitrógeno.

En función de la compatibilidad de los polímeros que se van a unir, las *fuentes externas de calor* se pueden elegir entre las siguientes:

- **Aire caliente** o *gases inertes*.
- **Soldadura con herramienta** o *con placa caliente*, donde las herramientas y dado calientes se presionan contra las superficies a unir, calentándolas por interdifusión de las cadenas moleculares: este proceso se utiliza comúnmente en la soldadura a tope de tubos de plástico y otros conductos.

- **Radiación infrarroja** (de lámparas de calor, de cuarzo, de alta intensidad); se concentra en un haz angosto sobre las superficies que se van a unir.
- **Ondas de radio**, son particularmente útiles para películas finas de polímero; las frecuencias están en el rango de 100 a 500 Hz.
- **Calentamiento dieléctrico**, a frecuencias de hasta 100 MHz, son eficaces para el calentamiento completo de polímeros como el nailon, cloruro de polivinilo, poliuretano y caucho.
- **Resistencia eléctrica**, en la que elementos (como alambres o cables, o cintas con base en carbono, láminas y cuerdas) se colocan en la interfase para crear calor por el paso de una corriente eléctrica, proceso conocido como soldadura por implante resistivo. De manera alternativa, en la soldadura por inducción, los elementos presentes en la interfase están sujetos a la exposición de radiofrecuencia; en ambos casos los elementos deben ser compatibles con el uso del producto que se une ya que permanecen en la zona de soldadura.
- **Láseres**, haces emisores no enfocados de baja potencia para evitar la degradación del polímero.

Las *fuentes internas de calor* se desarrollan por los siguientes medios:

- **Soldadura ultrasónica** (sección 31.3) es el proceso de uso más común para termoplásticos, en particular polímeros amorfos, como el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS, por sus siglas en inglés) y poliestireno de alto impacto; las frecuencias están en el rango de 20 a 40 kHz.
- **Soldadura por fricción** (también llamada *soldadura por giro*, para polímeros) y *soldadura por fricción lineal* (conocida también como *soldadura por vibración*), son particularmente útiles para unir polímeros con un alto grado de cristalinidad, como acetato, polietileno, varios tipos de nailon y polipropileno.
- **Soldadura orbital**, es semejante a la soldadura por fricción, excepto que el movimiento rotatorio de un componente tiene lugar en una trayectoria orbital.

El método de fusión es eficaz en particular con plásticos que no se pueden unir fácilmente por medio de adhesivos; con este proceso se pueden unir plásticos como PVC, polietileno, polipropileno, acrílicos y ABS. Se utilizan sistemas portátiles de sellamiento por fusión especialmente diseñados para unir en el campo tubos de plástico que suelen estar hechos de polietileno, los cuales se usan para la conducción de gas natural.

Las envolturas múltiples, coextruidas, para alimentos, consisten en diferentes tipos de película unidos por calor durante la extrusión (sección 19.2.1). Cada película tiene una función diferente; por ejemplo, una película puede conservar la humedad, otra aísla del oxígeno y una tercera facilita el sellamiento con calor durante el proceso de empaque. Algunas envolturas tienen hasta siete capas, todas unidas durante la producción de la película.

Unión adhesiva. Este método se ilustra mejor con la unión de secciones de tubos de PVC (de amplio uso en sistemas de plomería) y tubos ABS (que se emplean en sistemas de drenaje, desechos y ventilación). Primero se usa un recubrimiento que mejora la adhesión, para aplicar el adhesivo que conecta superficies del collar y el tubo (etapa que se parece mucho a la aplicación de selladores en la pintura), y después se prensan las piezas.

La unión adhesiva de polietileno, polipropileno y politetrafluoretileno (Teflón) puede ser difícil porque los adhesivos no permanecen fácilmente sobre ellos. Las superficies de partes elaboradas con estos materiales por lo general tienen que ser tratadas químicamente para mejorar la adhesión. También es eficaz el empleo de recubrimientos adhesivos previos o de cintas adhesivas de doble cara.

Sujeción mecánica. Este método es eficaz en particular para la mayoría de termoplásticos (debido a su tenacidad y resiliencia inherentes) y para unir plásticos con metales.

Pueden usarse tornillos de plástico o metal; el uso de tornillos de autorroscado es una práctica común. Los *sujetadores de presión integrados* han alcanzado gran aceptación para simplificar las operaciones de ensamblado; en las figuras 32.19f y g se muestran las geometrías más comunes de sujetadores. Dado que el sujetador puede moldearse directamente al mismo tiempo que el plástico, aumenta muy poco el costo del ensamble.

Unión con solventes. Este método consiste en la secuencia siguiente:

1. Se da a las superficies un acabado rugoso por medio de un abrasivo.
2. Se humedecen y limpian las superficies con un solvente apropiado para el polímero en particular.
3. Se presionan y mantienen juntas las superficies hasta que se alcanza una suficiente resistencia de la unión.

Unión electromagnética. Los termoplásticos también se pueden unir con medios *magnéticos*, por la acción de incrustar en el polímero diminutas partículas metálicas del orden de $1\ \mu\text{m}$ ($40\ \mu\text{pulg}$). Después, un campo de alta frecuencia provoca calentamiento por inducción del polímero y lo funde en las interfases por unir.

32.6.2 Uniones de materiales termofijos

Los plásticos termofijos, como epóxicos y fenoles, se pueden unir aplicando las siguientes técnicas:

- **Insertos roscados** y moldeados.
- **Sujetadores mecánicos**, en particular tornillos de autorroscado y sujetadores de presión integrados.
- **Unión con solventes.**
- **Curado simultáneo**, en el cual los dos componentes que se van a unir se colocan juntos y se curan al mismo tiempo.
- **Unión adhesiva.**

CASO DE ESTUDIO 32.1 Curado ligero de adhesivos acrílicos para productos médicos

La empresa Cobe Cardiovascular, Inc., fabrica sistemas de extracción y procesamiento de sangre, así como sistemas extracorporales para cirugía cardiovascular. La compañía, como muchos otros fabricantes, por tradición empleaba solventes para unir componentes de productos y subensambles. Sin embargo, varias instituciones federales estadounidenses han comenzado a presionar a las empresas para que eviten el uso de solventes y Cobe, en particular, desea abandonar el empleo de cloruro de metileno por razones ambientales y de seguridad en el lugar de trabajo.

Para lograr su objetivo, la compañía comenzó a rediseñar la mayoría de sus ensambles con el fin de usar adhesivos de curado ligero (con luz ultravioleta o visible). La mayoría de sus productos estaban hechos de plásticos transparentes; en consecuencia, sus ingenieros necesitaban hacer uniones con adhesivos claros por razones estéticas y sin propensión a sufrir cuarteaduras o agrietamiento por esfuerzo.

Como ejemplo de un producto frecuente, el contenedor de sangre para emergencias de Cobe es un artículo de forma oval (figura 32.20), de policarbonato, con altura aproximada de 300 mm (12 pulg), diámetro mayor de 200 mm (8 pulg) y profundidad de 100 mm (4 pulg). El recipiente se usa una sola vez y es desechado; su propósito es contener y conservar la sangre durante las cirugías a corazón abierto o de tórax, o en procedimientos artroscópicos y de emergencia.

En el recipiente es posible almacenar hasta 3000 cc de sangre, mientras ésta espera su paso por una centrifugadora de 250 cc que la limpia y devuelve al paciente una vez concluido el procedimiento quirúrgico. El recipiente de almacenamiento consiste en una tapa de policarbonato unida a una cubeta del mismo material. La unión tiene una configuración de lengüeta con muesca; el objetivo era lograr una unión fuerte y elástica que soportara repetidos esfuerzos sin sufrir fugas.

(continúa)



FIGURA 32.20 Recipiente de Cobe Laboratories para almacenar sangre; la tapa está unida a la cubeta con una unión adhesiva de lengüeta y muesca a prueba de aire. Fuente: Cortesía de Cobe Laboratories.

Los adhesivos de acrílico de curado ligero ofrecen un rango de rendimiento en sus propiedades que los hacen apropiados para esta aplicación, ya que, en primer lugar y lo más importante, tienen una alta resistencia en su unión con los termoplásticos que se usan comúnmente para formar las cubiertas de equipos médicos. Por ejemplo, el Loctite® 3211 (vea adhesivos anaeróbicos en la sección 32.4.1) tiene una resistencia de 11 MPa (1600 psi) al esfuerzo cortante sobre policarbonato. Si bien es muy importante la resistencia cortante inicial, lo es aún más que el adhesivo sea capaz de mantenerla después de la esterilización.

Otra consideración que hace que los adhesivos de curado ligero sean apropiados para esta aplicación es su disponibilidad en fórmulas que les permiten soportar grandes esfuerzos antes de sufrir un reblandecimiento; por ejemplo, el Loctite 3211 se reblandece con elongaciones de más de 200%. La flexibilidad es crítica porque es común que las uniones adheridas estén suje-

tas a curvaturas y flexiones pronunciadas cuando los equipos se presurizan durante las pruebas de calidad y en el uso cotidiano. Si un adhesivo es demasiado rígido fallará al someterse a este tipo de prueba, aun si ofreciera más resistencia al esfuerzo cortante que un adhesivo comparable y más flexible. Existen muchos acrílicos de curado ligero con fórmulas que cumplen la certificación estándar internacional de calidad (ISO; vea la sección 36.6), lo que significa que cuando se procesan en forma apropiada no causarán problemas de biocompatibilidad en el ensamble final.

También es importante que la unión se diseñe de modo adecuado para maximizar el rendimiento. Si el cierre se une con una unión consistente en dos caras planas en contacto estrecho, los esfuerzos de desprendimiento (vea la figura 32.10) actuarán sobre la unión cuando se presurice la vasija. Estos esfuerzos son el tipo más difícil de soportar para una unión adhesiva, ya que toda la carga se concentra en la arista principal de la unión. El diseño de lengüeta y muesca que adoptó la compañía se dirigía a satisfacer ese propósito, con la muesca actuando para mantener y contener el adhesivo durante la operación de suministro.

Cuando las partes se unen y el adhesivo está curado, este diseño permite que gran parte de la carga sobre la junta (al presurizar el equipo) se convierta en fuerzas cortantes y de tensión (a las cuales el adhesivo resiste mucho mejor). El espacio entre la lengüeta y la muesca varía mucho porque la mayor parte de adhesivos de curado ligero se pueden preparar rápidamente a profundidades mayores de 5 mm (0.20 pulg). Esta característica permite que el fabricante tenga un proceso robusto de la unión, lo cual significa que se pueden aceptar tolerancias dimensionales amplias.

Con el nuevo diseño y el uso de este adhesivo se eliminaron las preocupaciones ambientales y los aspectos asociados a la unión con solventes, con los beneficios adicionales de tener una unión más segura, rápida y consistente. El adhesivo de curado ligero brindó la línea de unión estética que buscaba la compañía, clara y apenas perceptible. También dio la resistencia estructural requerida, lo que mantuvo competitiva a la empresa en el mercado.

Fuente: Cortesía de P. J. Courtney, Loctite Corporation.

32.6.3 Unión de cerámicos y vidrios

Ahora hay disponible una amplia variedad de cerámicos y vidrios con propiedades únicas e importantes. Los cerámicos y vidrios se usan como productos y componentes de éstos, o como herramientas, moldes y dados. Estos materiales con frecuencia se ensamblan en componentes o subensambles y se unen ya sea con el mismo tipo de material o con otros diferentes metálicos o no metálicos. Por lo general, los cerámicos, vidrios y muchos mate-

riales similares se pueden unir con uniones adhesivas. Un ejemplo común es el ensamble de piezas de cerámica rotas con un pegamento epóxico de dos componentes, que viene en dos tubos separados y se mezcla justo antes de su aplicación. Otros métodos de unión incluyen medios mecánicos, como sujetadores y muelles o broches de presión.

Cerámicos. Como se describió en el capítulo 8, los cerámicos tienen propiedades muy diferentes con respecto a los materiales metálicos y no metálicos, en especial en cuanto a su rigidez, dureza, fragilidad, resistencia a las altas temperaturas y falta de reactividad química. La unión entre ellas o con otros materiales metálicos o no metálicos requiere consideraciones especiales; ahora existen varios procesos de unión muy especializados.

Una técnica común que es eficaz para unir combinaciones de materiales difíciles de pegar consiste en aplicar primero un recubrimiento que se adhiera bien a uno o ambos componentes, con lo que actúa como agente de unión. Por ejemplo, la superficie de *cerámica de alúmina* se puede *metalizar*, como se describe en la sección 34.5. En esta técnica, conocida como proceso *Mo-Mn*, primero se recubre la parte de cerámica con una solución de óxidos de molibdeno y manganeso. A continuación se flamea la parte, lo que forma una capa vidriada sobre su superficie. Luego se recubre esta capa con níquel; como la parte ya tiene una superficie metálica, puede unirse con soldadura fuerte a una superficie metálica por medio de un metal de aporte apropiado.

El carburo de tungsteno y el de titanio se unen con facilidad a otros metales por medio de soldadura fuerte, ya que ambos tienen matriz metálica: WC tiene matriz de cobalto y el TiC la tiene en forma de aleación de níquel-molibdeno (vea el capítulo 22). Entre las aplicaciones comunes se incluyen la soldadura fuerte de nitruro de boro cúbico o puntas de diamante con insertos de carburo (figuras 22.10 y 22.11), así como puntas de carburo para barrenos de albañilería (figura 23.22d). En función de su estructura particular, los cerámicos y metales también se pueden unir por *adhesión por difusión*, aunque puede ser necesario colocar una capa metálica en la unión con el fin de hacerla más fuerte.

Los componentes cerámicos también se pueden unir o ensamblar durante el proceso primario de formado (sección 18.2); un ejemplo común es la sujeción de orejas a tazas de café antes de hornearlas. Así, se da forma a todo el producto de manera *integral* en lugar de realizar una operación adicional después de elaborada la parte.

Vidrios. Como lo evidencia la disponibilidad de numerosos objetos de vidrio, los tipos de este material se pueden adherir fácilmente entre sí. Por lo común esto se realiza calentando primero y reblandeciendo la superficie que se va a unir, para luego prensar ambas piezas entre sí y, por último, dejarlas enfriar. También es posible pegar vidrio con metales gracias a la difusión de iones metálicos en la estructura amorfa de la superficie del vidrio; sin embargo, deben tomarse en cuenta las diferencias en los coeficientes de dilatación térmica de los dos materiales.

32.7 Economía de las operaciones de unión

Igual que en la economía de las operaciones de soldadura metalúrgica (descrita en la sección 31.8), la de los procesos de unión estudiados en este capítulo depende mucho de varias consideraciones. En la tabla VI.1 se observa que, en términos relativos, la distribución del costo de algunos de estos procesos es:

- *Más alta:* soldadura fuerte, pernos, tuercas y otros sujetadores.
- *Intermedia:* remachado y unión adhesiva.
- *Más baja:* costuras y plegado.

A continuación se describen varios procesos y los costos generales involucrados. Para la **soldadura fuerte**,

- Soldadura fuerte manual: el equipo básico cuesta alrededor de \$300 dólares estadounidenses, pero sube a más de \$50 000 para sistemas automatizados.

- Soldadura fuerte con horno: el costo varía mucho; va desde unos \$2000 para hornos sencillos de un lote, hasta más de \$300 000 para otros de vacío continuos.
- Soldadura fuerte por inducción: para unidades pequeñas el costo es de alrededor de \$10 000.
- Soldadura fuerte por resistencia: el equipo cuesta cerca de \$1000, para unidades sencillas, hasta más de \$10 000 para las grandes y más complejas.
- Soldadura fuerte de inmersión: el costo del equipo varía mucho, desde \$2000 hasta más de \$200 000; los equipos más caros incluyen herramientas de control computarizado.
- Soldadura fuerte infrarroja: el costo del equipo va de \$500 a \$30 000.
- Soldadura fuerte por difusión: el equipo cuesta entre \$50 000 y \$300 000.

Soldadura blanda. El costo del equipo depende de su complejidad y del nivel de automatización. Va de menos de \$20 para las planchas de soldadura manual, hasta más de \$50 000 para equipo automatizado.

RESUMEN

- Los procesos de unión que no se basan en la fusión o presión en las interfases incluyen la soldadura fuerte y la blanda; utilizan materiales de aporte que requieren algún aumento en la temperatura de la unión. Se pueden usar para unir metales disímboles de formas intrincadas y espesores variados.
- La unión adhesiva ha ganado más aceptación en las principales industrias, como la aeroespacial y la automotriz. Además de tener buena resistencia en la unión, los adhesivos tienen otras características favorables como la capacidad de sellar, aislar, impedir la corrosión electroquímica entre metales disímboles y la reducción de la vibración y el ruido por medio del humedecimiento interno de la unión. Factores importantes son la preparación de la superficie y el diseño de la unión.
- La sujeción mecánica es uno de los métodos de unión más comunes. Pernos, tornillos y tuercas son los sujetadores habituales para componentes y estructuras de máquina que es probable deban separarse para mantenimiento y por facilidad de transporte.
- Los remaches y otros sujetadores son semipermanentes o permanentes; se usan en edificios, puentes y equipo de transporte.
- Los termoplásticos se unen con técnicas de soldadura por fusión, unión adhesiva o sujeción mecánica. Los termofijos suelen unirse por medios mecánicos, como insertos y sujetadores moldeados, o por adhesión con solvente. Los cerámicos se unen con técnicas de unión adhesiva y metalización. Los vidrios se adhieren por calentamiento de las interfases o por el empleo de adhesivos.

TÉRMINOS CLAVE

Adhesivos conductores de la electricidad	Metal de aporte	Soldadura fuerte	Unión adhesiva
Ajuste con prensa	Prensado	Soldadura metalúrgica fuerte	Unión con solventes
Ajuste por contracción	Preparación del orificio	Soldadura ondulatoria	
Costura (engargolado)	Remache	Sujeción mecánica	
Costura (grapas)	Soldadura blanda	Sujetador de presión	
Engrapado	Soldadura blanda libre de plomo	Sujetador de presión integrado	
Fundente	Soldadura blanda por reflujo	Sujetadores	
		Sujetadores roscados	

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, R. D. (ed.), *Adhesive-bonding: Science, Technology and Applications*, CRC Press, 2005.
- Bath, J. (ed.), *Lead-Free Soldering*, Springer, 2007.
- Bickford, J. H., *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints*, 4a. ed., Marcel Dekker, 2007.
- Brazing Handbook*, 5a. ed., American Welding Society, 2007.
- Brockmann, W., Geiss, P. L., Klingen, J. y Schroeder, K. B., *Adhesive-bonding: Materials, Applications and Technology*, Wiley, 2009.
- Ebnesajjad, S., *Adhesives Technology Handbook*, 2a. ed., William Andrew, 2008.
- Gourley, R. y Walker, C. (eds.), *Brazing and Soldering 2012*, American Society for Metals, 2012.
- Hamrock, B. J., Jacobson, B. y Schmid, S. R., *Fundamentals of Machine Elements*, 2a. ed., McGraw-Hill, 2005.
- Humpston, G. y Jacobson, D. M., *Principles of Soldering*, ASM International, 2004.
- Jacobson, D. M. y Humpston, G., *Principles of Brazing*, ASM International, 2005.
- Petrie, E. M., *Handbook of Adhesives and Sealants*, 2a. ed., McGraw-Hill, 2006.
- Pizzi, A. y Mittal, K. L., *Handbook of Adhesive Technology*, 2a. ed., CRC Press, 2003.
- Roberts, P., *Industrial Brazing Practice*, CRC Press, 2003.
- Rotheiser, J., *Joining of Plastics: Handbook for Designers and Engineers*, 3a. ed., Hanser, 2009.
- Schwartz, M. M., *Brazing*, 2a. ed., ASM International, 2003.

PREGUNTAS DE REPASO

- 32.1** ¿Cuál es la diferencia entre la soldadura fuerte y la blanda?
- 32.2** En la soldadura fuerte, ¿son necesarios los fundentes? Si es así, ¿por qué?
- 32.3** ¿Por qué es importante la preparación de la superficie en la unión adhesiva?
- 32.4** ¿Qué materiales se usan comúnmente en la soldadura blanda?
- 32.5** La soldadura blanda por lo general se aplica a componentes delgados. Explique por qué.
- 32.6** Explique las razones por las que con el paso de los años se han desarrollado varios métodos de unión mecánica.
- 32.7** Elabore una lista de tres técnicas de soldadura fuerte y tres de soldadura blanda.
- 32.8** Describa las semejanzas y diferencias entre las funciones de un perno y las de un remache.
- 32.9** ¿Qué precauciones se deben tomar en la unión mecánica de metales disímboles?
- 32.10** ¿Qué dificultades están involucradas en la unión de plásticos? ¿Por qué?
- 32.11** ¿Cuáles son las ventajas de los remaches?
- 32.12** ¿Cuáles son los principios de la soldadura (a) ondulatoria y (b) por reflujo?
- 32.13** ¿Qué es una prueba de desprendimiento? ¿Por qué es útil?
- 32.14** ¿Qué es una unión de combinación?
- 32.15** ¿Cuáles métodos de prueba se usan para evaluar los adhesivos?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 32.16** Describa algunas aplicaciones que tengan en la manufactura las cintas adhesivas de un solo lado y las de doble cara.
- 32.17** Explique cómo se logra que los adhesivos sean conductores de la electricidad.
- 32.18** Comente sus observaciones con respecto a las uniones mostradas en las figuras 32.3, 32.6, 32.10 y 32.11.
- 32.19** Proporcione ejemplos de uniones combinadas distintas a las que aparecen en la figura 32.13.
- 32.20** Analice la necesidad de arreglos de sujeción de las piezas de trabajo en los procesos de unión descritos en este capítulo.
- 32.21** Explique por qué las uniones hechas con adhesivos tienden a ser débiles ante el desprendimiento.
- 32.22** Es una práctica común recubrir con estaño las terminales eléctricas para facilitar la soldadura blanda. ¿Por qué?
- 32.23** Dé tres aplicaciones donde la unión adhesiva es el mejor método de unión.
- 32.24** ¿Qué tan importante es el ajuste cercano de dos partes que se van a unir con soldadura fuerte? Explique.
- 32.25** Si usted va a diseñar una unión que debe ser fuerte y también se necesita desarmar varias veces durante la vida del producto, ¿qué tipo de unión recomendaría? Explique.
- 32.26** Revise la figura 32.11 y explique por qué se ha clasificado de esa manera a los ejemplos bajo los enunciados ‘Malo’, ‘Bueno’ y ‘Muy bueno’.
- 32.27** Clasifique las uniones por traslape, a tope y ahusadas en términos de su resistencia. Explique sus respuestas.
- 32.28** ¿Cuáles son las ventajas de los sujetadores de presión integrados?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

32.29 En relación con las uniones a tope sencillas y traslapadas que se muestran en la fila superior de la figura 32.10a, resuelva lo siguiente. (a) Suponiendo que el área de la unión a tope es de $5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, y en relación con las propiedades del adhesivo dadas en la tabla 32.3, estime la fuerza de tensión mínima y máxima que puede soportar esta unión. (b) Estime estas fuerzas para la unión de traslape, si el área es de $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$.

32.30 En la figura 32.12a, suponga que la sección transversal de la unión por traslape es de $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, que el diámetro del remache sólido es de 4 mm y que está hecho de cobre. Con el uso del adhesivo más fuerte que se ilustra en la tabla 32.3, estime la fuerza de tensión máxima que puede soportar dicha unión.

32.31 Como se aprecia en la figura 32.15a, un remache se puede pandear si es demasiado largo. En relación con el capítulo 14 acerca del forjado, determine la razón máxima de la longitud al diámetro de un remache, de modo que no se deforme durante el proceso de remachado.

32.32 La figura 32.4 muestra en forma cuantitativa la resistencia a la tensión y al esfuerzo cortante, en la soldadura fuerte, como función de la holgura de la unión. Investigue en la bibliografía técnica, obtenga datos y grafique cuantitativamente dichas curvas. Comente sus observaciones.

32.33 Cuando se manufactura el fuselaje de un aeroplano de transbordo, las placas de aluminio se unen con adhesivos con uniones de traslape. Debido a que con este tipo de unión la deformación elástica de una placa difiere de la de dos placas, el esfuerzo cortante máximo en el adhesivo es lo doble que el esfuerzo cortante promedio. El esfuerzo cortante del adhesivo es de 20 MPa , la resistencia a la tensión de las placas de aluminio es de 95 MPa y su espesor es de 4.0 mm . Calcule la longitud de traslape que se necesita para formar la unión adhesiva dos veces más fuerte que la placa de aluminio.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

32.34 Examine varios productos domésticos y describa cómo están unidos y ensamblados sus componentes. Explique por qué se emplean esos procesos en particular y no otros.

32.35 Mencione varios productos que se hayan ensamblado con (a) engargolado; (b) engrapado y (c) soldadura blanda.

32.36 Sugiera métodos de unir un cilindro (hecho de plástico termofijo) en forma perpendicular a una placa metálica plana. Analice sus ventajas y limitaciones.

32.37 Describa las herramientas y equipo que se necesitarían para realizar la operación de engargolado doble seguro que se muestra en la figura 32.17, comenzando con una placa delgada y plana.

32.38 Prepare una lista de lineamientos de diseño para hacer uniones con los procesos descritos en este capítulo. ¿Los lineamientos serían comunes a la mayoría de los procesos? Explique.

32.39 ¿Qué métodos de unión serían apropiados para ensamblar una cubierta de termoplástico sobre un marco de metal? Suponga que la cubierta se retira periódicamente, como la manija de una cafetera.

32.40 Resuelva el problema 32.39, pero para una cubierta hecha de (a) un termofijo; (b) un metal y (c) un cerámico. Describa los factores involucrados en la selección de los métodos.

32.41 Comente sobre el tamaño de la pieza de trabajo y las limitaciones de la forma, si las hubiera, para cada uno de los procesos descritos en este capítulo.

32.42 Describa las formas de la parte que no se pueden unir con los procesos cubiertos en este capítulo. Presente ejemplos específicos.

32.43 Dé ejemplos de productos en los que tengan que removerse los remaches de una estructura o ensamble, y que después se reemplacen por otros nuevos.

32.44 Visite una tlapalería e investigue la geometría de las cabezas de tornillos que son sujetadores permanentes —es decir, que pueden entrar pero no salir.

32.45 Obtenga un caudín de soldadura blanda y trate de soldar dos alambres. En primer lugar, intente aplicar la soldadura al mismo tiempo que coloca el caudín sobre la punta de los alambres. En segundo lugar, haga un precalentamiento de éstos antes de aplicar la soldadura blanda. Repita el procedimiento para una superficie fría y otra caliente. Registre sus resultados y explique sus descubrimientos.

32.46 Haga una investigación bibliográfica para determinar las propiedades y tipos de los adhesivos que se usan para fijar una cadera artificial sobre un fémur humano.

32.47 Revise la figura 32.9a y explique las desventajas de usar una viga de espesor constante en lugar de otra en cantiléver con doble inclinación.

32.48 Revise la figura 32.9 y dibuje con cuidado las distribuciones de fuerzas que esperaría con cada geometría.

32.49 Diseñe una unión que conecte dos miembros de acero de 25 mm de ancho y 5 mm de espesor. El traslape puede ser hasta de 25 mm y puede usar cualquier método de los descritos en este capítulo.

32.50 Para los mismos miembros del problema 32.49, diseñe una unión que utilice sujetadores roscados distribuidos en una fila. ¿Aconsejaría el uso de un solo sujetador grande o de muchos pequeños? Explique su respuesta.

32.51 Para los mismos miembros del problema 32.49, diseñe una unión empleando una combinación de técnicas.

Tecnología de superficies

Nuestro primer contacto visual o táctil con los objetos a nuestro alrededor es a través de sus superficies, podemos ver y sentir la rugosidad de las superficies, su aspecto ondulante, su poder de reflexión y otras características. En los capítulos anteriores se describieron las propiedades de materiales y componentes manufacturados, sobre todo en términos de sus características *volumétricas*, como la resistencia, ductilidad, dureza y tenacidad. También se incluyeron algunas descripciones de las influencias que tienen las superficies sobre dichas propiedades, como el efecto de la preparación de éstas en la vida de fatiga y en los procesos de unión, así como la sensibilidad de los materiales frágiles con respecto a la rugosidad de la superficie, raspaduras y otros defectos.

La maquinaria y sus accesorios tienen numerosos elementos que se deslizan uno contra otro, como rodamientos, rampas, pistones y cilindros, al igual que herramientas y dados para ejecutar operaciones de corte y formado. Un examen de cerca revelará que algunas de estas superficies

- Son suaves, mientras que otras son ásperas.
- Se deslizan una contra otra a velocidades relativamente grandes, mientras que unas más lo hacen lentamente.
- Están lubricadas, en tanto otras se encuentran secas.
- Quedan sometidas a cargas pesadas, cuando las hay que soportan cargas ligeras.
- Están expuestas a temperaturas elevadas, en tanto que otras se hallan a temperatura ambiente.

Además de sus características geométricas, una **superficie** constituye una capa delgada sobre el conjunto del material. Las propiedades mecánicas, físicas, químicas y metalúrgicas de una superficie dependen no sólo del material y su historia de procesamiento, sino también del ambiente al que se ha expuesto la superficie. En consecuencia, la superficie de una parte manufacturada suele poseer propiedades y comportamiento que son significativamente diferentes a las del resto de su conjunto.

Aunque el total del material por lo general determina las propiedades mecánicas de todo el componente, las superficies de éste influyen directamente en el rendimiento de la parte en lo que respecta a lo siguiente (vea la figura VII.1):

- Características geométricas y del aspecto de la parte, al igual que su rol en las operaciones subsiguientes como la soldadura metalúrgica, soldadura blanda, unión adhesiva, pintura y recubrimiento.
- Resistencia a la corrosión.
- Eficacia de los lubricantes durante el proceso de manufactura y a lo largo de la vida de servicio de la parte.

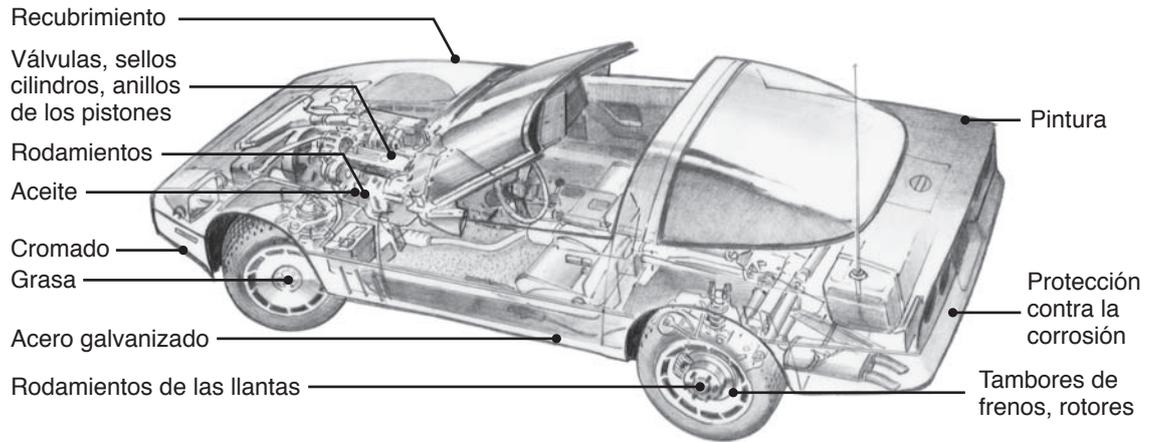


FIGURA VII.1 Componentes de un automóvil común que se relacionan con los temas estudiados en la parte VII.

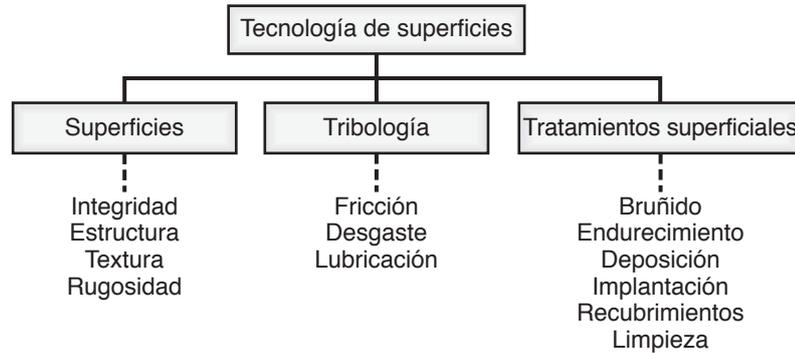


FIGURA VII.2 Panorama de los temas cubiertos en la parte VII.

- Inicio y propagación de grietas como resultado de defectos de la superficie, como rugosidad, rayones, costuras y zonas afectadas por el calor que pueden llevar al debilitamiento y falla prematura de la parte debido a la fatiga.
- Conductividad térmica y eléctrica de los cuerpos en contacto; por ejemplo, las superficies ásperas tienen menor conductividad térmica y eléctrica que las suaves.
- Fricción y desgaste de las herramientas, moldes y dados usados en la manufactura, así como de los productos elaborados.

De acuerdo con el panorama descrito en la figura VII.2, el capítulo 33 analiza las características de las superficies en términos de su estructura y topografía. Después se describen las variables del material y del proceso que influyen en la fricción, desgaste y lubricación de los materiales. El capítulo 34 describe los métodos que se utilizan para modificar las superficies con el fin de mejorar su comportamiento ante la fricción, eficacia de los lubricantes, resistencia al desgaste y la corrosión, así como el acabado y aspecto de la superficie.

Rugosidad de una superficie y su medición; fricción, desgaste y lubricación

CAPÍTULO

33

- Este capítulo describe las distintas características de las superficies que tienen un efecto directo tanto en la selección de los procesos de manufactura como en la vida de servicio de las partes producidas.
- Se estudian características de la superficie como la rugosidad, textura y capa exterior, así como los métodos aplicados para describir y medir cuantitativamente las superficies.
- El capítulo también examina la naturaleza de la fricción, su rol en la manufactura y los factores involucrados en su magnitud.
- Después se analizan el desgaste y la lubricación junto con otros diversos métodos utilizados para minimizar el desgaste.
- El capítulo termina con un resumen de los lubricantes de uso común y su selección para un proceso de manufactura particular y de los materiales involucrados.

33.1	Introducción	963
33.2	Estructura e integridad de una superficie	964
33.3	Textura y rugosidad de una superficie	966
33.4	Fricción	969
33.5	Desgaste	973
33.6	Lubricación	976
33.7	Fluidos en el trabajo de metales y su selección	978

EJEMPLO:

33.1	Determinación del coeficiente de fricción	973
------	---	-----

33.1 Introducción

Las superficies son entidades distintas con propiedades que llegan a variar significativamente de las del volumen; éste es en particular el caso de los metales debido a capas de óxido superficial, capas difíciles de trabajar y otras características más. En una superficie puede haber varios defectos, lo que depende de la manera en que se generó. Estos defectos, y otras texturas de la superficie, tienen una gran influencia en la integridad de la superficie de las piezas de trabajo, así como en la de las herramientas, moldes y dados.

Después se describen los métodos comunes de medición de la rugosidad de una superficie en la práctica de la ingeniería, inclusive la instrumentación necesaria, seguida de una breve descripción de los requerimientos de rugosidad en el diseño y productos de ingeniería. Debido a la creciente importancia en la manufactura de precisión y nanofabricación, también se estudian las mediciones en tres dimensiones de la superficie.

Posteriormente, en el capítulo se describen aquellos aspectos de *fricción, desgaste y lubricación* que en conjunto se conocen como **tribología** y que son relevantes en los procesos y operaciones de manufactura y en la vida de servicio de los productos. También se estudia la naturaleza de la fricción y el desgaste de los materiales metálicos y no metálicos, así como la forma en que reciben la influencia de las distintas variables de los materiales y su proceso. El desgaste tiene un gran impacto económico y se estima que tan sólo en Estados Unidos el costo total de reemplazar partes desgastadas es de más de 100 mil millones de dólares por año.

Por último se describen los fundamentos de los fluidos en el trabajo de los metales, inclusive los tipos, características y aplicaciones de los lubricantes líquidos y sólidos de uso común, así como las prácticas de lubricación empleadas, y la importancia de las consideraciones biológicas y ambientales en el uso, aplicación, reciclado y eliminación de dichos fluidos.

33.2 Estructura e integridad de una superficie

Un examen minucioso permite observar que la superficie de una pieza de metal por lo general consta de varias capas, como se ilustra en la figura 33.1:

1. El *conjunto* del metal, también conocido como **sustrato** del metal, tiene una estructura que depende de la composición e historia de procesamiento del metal.
2. Sobre el conjunto del metal hay una capa que generalmente ha sufrido una deformación plástica y que el trabajo ha endurecido mucho más que al resto durante el proceso de manufactura. La profundidad y propiedades de la capa endurecida, llamada **estructura de la superficie**, dependen de factores como el método de procesamiento empleado y los efectos del deslizamiento que causa fricción sobre la superficie. Si, por ejemplo, la superficie ha sido producida maquinándola con una herramienta mellada y desgastada (vea la figura 21.22), o ha estado sujeta a deslizamiento contra herramientas y dados, la *capa endurecida por el trabajo* será relativamente gruesa y, por lo común, también desarrollará esfuerzos residuales (sección 2.11).
3. También puede estar presente una *capa amorfa* (sin estructura cristalina; también llamada capa de *Beilby*, en honor de G. Beilby). Esa capa amorfa se forma cuando una superficie se sujeta a un calor elevado o incluso a la fusión (como la que ocurre con fuerzas de fricción muy grandes) para luego ser enfriada con rapidez, de manera que los granos no tienen tiempo de formar una estructura cristalina (vea la sección 1.5). Esto puede ocurrir, por ejemplo, en las operaciones de corte con flama o de esmerilado con altos esfuerzos.
4. A menos que el metal se procese y conserve en un ambiente inerte (libre de oxígeno), o que sea un metal noble (como el oro o platino), se forma una **capa de óxido** sobre la capa endurecida por el trabajo. Por lo general la capa de óxido es mucho más dura que el metal base, por lo que es más abrasiva; como resultado, tiene efectos importantes en la fricción, desgaste y lubricación. Cada metal forma su propio óxido u óxidos y su comportamiento puede ser muy complejo. Por ejemplo:
 - El *hierro* tiene una estructura superficial de óxido, con FeO adyacente al volumen del metal, seguido por una capa de Fe₃O₄ y luego otra de Fe₂O₃ (la cual está expuesta al ambiente).
 - El *aluminio* tiene una capa superficial de Al₂O₃ densa, amorfa, y sobre ella hay otra capa de óxido de aluminio hidratado gruesa y porosa.
 - El *cobre*, cuando está recién raspado o maquinado, tiene una superficie brillante y lustrosa; sin embargo, pronto desarrolla una capa de Cu₂O que está cubierta con otra de CuO; esta última da al cobre su color ligeramente opaco.

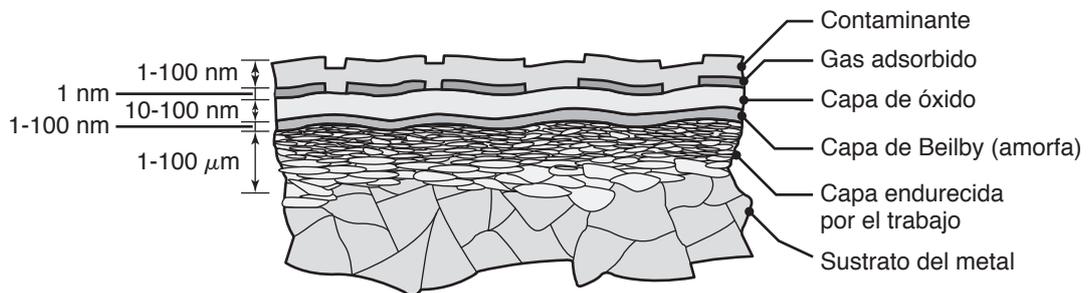


FIGURA 33.1 Ilustración esquemática de la sección transversal de la estructura superficial de un metal; el espesor de las capas individuales depende tanto de las condiciones de procesamiento como del ambiente en que tuvo lugar. *Fuente:* Tomado de E. Rabinowicz y B. Bhushan.

- Los *aceros inoxidables* no se oxidan porque desarrollan una capa protectora de óxido de cromo (por pasivación, como se describe en la sección 3.8).
5. En condiciones ambientales normales, las capas de óxido superficial por lo general están cubiertas por otras capas *adsorbidas* de gas y humedad.
 6. Por último, la superficie más externa del metal puede estar cubierta por contaminantes, como suciedad, polvo, residuos de lubricante, restos de compuestos de limpieza y contaminantes del ambiente.

De este modo, las superficies tienen propiedades que generalmente son muy diferentes de las del material del sustrato. Los factores que conciernen a las estructuras superficiales de los metales y que acabamos de describir también son los que influyen en la estructura de la superficie de plásticos y cerámicos (capítulos 7 y 8). La textura de la superficie de estos materiales también depende del método de producción, como en el caso de los metales.

Integridad de la superficie. La *integridad de la superficie* describe no solamente los rasgos topológicos (geométricos) de las superficies y sus propiedades físicas y químicas, sino también sus propiedades y características mecánicas y metalúrgicas. La integridad de la superficie es una consideración importante en las operaciones de manufactura porque influye en propiedades como la resistencia a la fatiga (vea la figura 2.29), a la corrosión y a la vida de servicio.

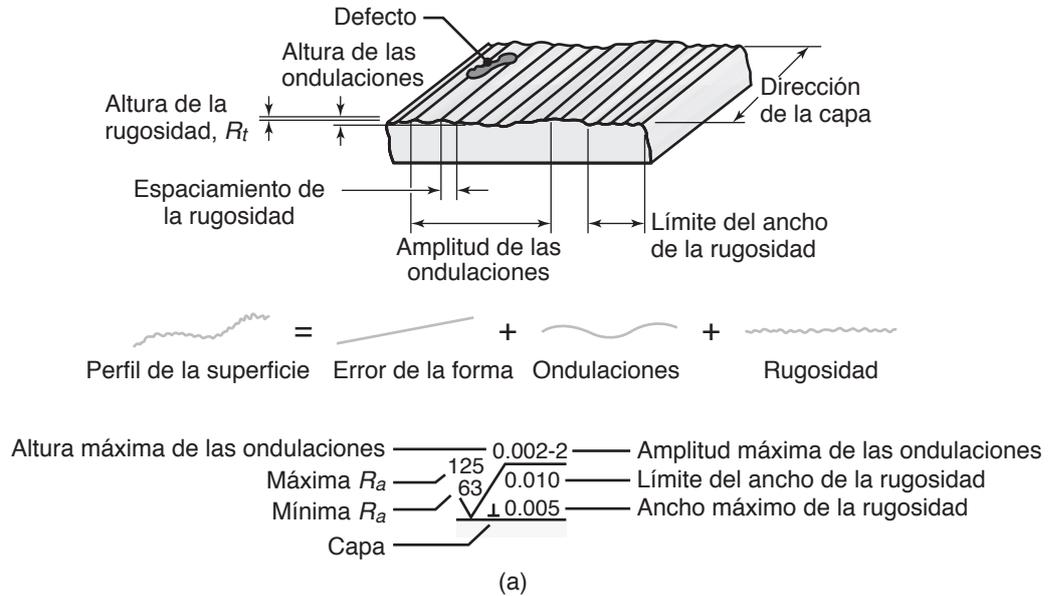
Varios *defectos de la superficie* causados y producidos durante la manufactura del componente pueden ser los responsables de una integridad superficial inadecuada. Estos defectos suelen ser causados por una combinación de factores como (a) defectos en la materia prima u original; (b) el método o métodos con los que se produjo la superficie y (c) un control inadecuado de los parámetros del proceso, los cuales llegan a ocasionar esfuerzos, temperaturas y deformación excesiva de la superficie.

La siguiente lista da definiciones generales de los principales **defectos de la superficie** (en orden alfabético) que se encuentran en la práctica:

- **Ataque intergranular**, es el debilitamiento de los límites de grano debido a fragilidad y corrosión por metal líquido (sección 1.5.2).
- **Cráteres**, son depresiones poco profundas.
- **Deformación plástica de la superficie**, es una deformación superficial grave ocasionada por grandes esfuerzos debido a factores como la fricción, geometría de las herramientas y dados, herramientas desgastadas y métodos de procesamiento (vea por ejemplo la figura 21.21).
- **Esfuerzos residuales** en la superficie, son causados por deformación no uniforme y distribución irregular de la temperatura (sección 2.11).
- **Grietas**, las cuales pueden ser externas o internas; aquellas que para verse requieren una ampliación de 10× o más se llaman **microgrietas**.
- **Inclusiones**, son pequeños elementos o compuestos no metálicos presentes en el material.
- **Picaduras**, son depresiones superficiales poco profundas, por lo general son el resultado de ataque químico o físico.
- **Salpicaduras**, son partículas pequeñas de metal derretido y vuelto a solidificar que se depositan en la superficie, como ocurre durante la soldadura metalúrgica.
- **Transformaciones metalúrgicas**, las cuales implican cambios microestructurales ocasionados por el ciclado de la temperatura del material; estos cambios consisten en transformaciones de fase, recristalización, pérdida de aleante, descarburización, derretimiento y el posterior colado, solidificación o deposición del material.
- **Traslapes, pliegues y costuras**, son defectos de la superficie que resultan del traslape de material durante el procesamiento (vea, por ejemplo, la figura 14.17).
- **Zona afectada por el calor**, es la porción de un metal que está sujeta a ciclado térmico sin llegar a la fusión, como la que se ilustra en la figura 30.19.

33.3 Textura y rugosidad de una superficie

Independientemente del método de producción, todas las superficies tienen sus propias características, las cuales en conjunto se conocen como *textura de la superficie*. Aunque la descripción de la textura como propiedad geométrica es compleja, se han establecido los siguientes lineamientos para identificar la textura de una superficie en términos de cantidades bien definidas y medibles (figura 33.2):



Símbolo de la capa	Interpretación	Ejemplos
=	Capa paralela a la línea que representa la superficie a que se aplica el símbolo.	
⊥	Capa perpendicular a la línea que representa la superficie a que se aplica el símbolo.	
X	Capa angular en ambas direcciones a la línea que representa la superficie a que se aplica el símbolo.	
P	Capa sin dirección, con picaduras, protuberancias o partículas.	

(b)

FIGURA 33.2 (a) Terminología y símbolos estándar para describir el acabado de una superficie; las cantidades están en micropulgadas. (b) Símbolos comunes de la superficie de una capa.

- **Imperfecciones o defectos**, son irregularidades aleatorias, como rayones, grietas, picaduras, depresiones, costuras, gotas o inclusiones.
- **Capa (direccionalidad)**, es la dirección del patrón predominante de la superficie, por lo general resulta evidente a simple vista.
- **Rugosidad**, se define como las desviaciones irregulares con espaciamento estrecho a pequeña escala; se expresa en términos de su altura, ancho y distancia a lo largo de la superficie.
- **Ondulaciones**, comprenden la desviación recurrente a partir de una superficie plana; se miden y describen en términos de la distancia entre las crestas adyacentes de las ondas (*amplitud de las ondulaciones*) y la altura entre sus crestas y valles (*longitud de las ondulaciones*).

Por lo general la **rugosidad de la superficie** se caracteriza por dos métodos. El **valor de la media aritmética** (R_a) se basa en la ilustración esquemática de una superficie rugosa, como se aprecia en la figura 33.3, y se define como

$$R_a = \frac{a+b+c+d+\dots}{n}, \quad (33.1)$$

donde todas las ordenadas a, b, c, \dots , son valores absolutos y n es el número de lecturas realizadas. Las *unidades* que por lo general se usan para medir la rugosidad superficial son μm (micras) o μpulg . Observe que $1 \mu\text{m} = 40 \mu\text{pulg}$, y que $1 \mu\text{pulg} = 0.025 \mu\text{m}$.

La **raíz del promedio de los cuadrados de rugosidad** (R_q , anteriormente identificada como RMS) se define como

$$R_q = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}{n}}. \quad (33.2)$$

La línea central AB de la figura 33.3 se coloca de manera que la suma de las áreas ubicadas por arriba de la línea sea igual a la suma de las áreas por debajo de la línea.

La **altura máxima de la rugosidad** (R_t) se define como la altura a partir de la depresión más profunda hasta el pico más alto. Indica cuánto material se tiene que remover para obtener una superficie plana, digamos por medio de pulido.

Debido a su sencillez, el valor de la media aritmética se adoptó internacionalmente en la década de 1950 y se usa mucho en la práctica de la ingeniería. Al dividir la ecuación (33.2) entre la (33.1) se obtiene la razón R_q/R_a , que para superficies normales producidas con maquinado y procesos de acabado vale 1.1 para el corte, 1.2 para el esmerilado y 1.4 para lapeado y asentado.

En general, una superficie no puede describirse sólo con sus valores de R_a o R_q , ya que éstos son promedios. Dos superficies podrían tener el mismo valor de rugosidad pero topografías reales muy diferentes. Por ejemplo, algunas depresiones en una superficie suave no afectarían significativamente los valores de la rugosidad. Sin embargo, este tipo de perfil sería muy importante en términos de las características de fricción, desgaste y fatiga del producto manufacturado. En consecuencia, importa mucho analizar una superficie con gran detalle, en particular las partes que van a usarse en aplicaciones críticas.

Símbolos para la rugosidad de la superficie. Los límites para la rugosidad de la superficie se especifican en los planos técnicos por medio de símbolos, es común que sean los que se muestran en la leyenda de la parte inferior de la figura 33.2a, y los valores de estos límites se colocan a la izquierda de la marca. Los símbolos se usan para describir una superficie y sólo especifican su rugosidad, ondulaciones y capa; no incluyen defectos. Por tanto, siempre que sea necesario hay que incluir una nota especial en las especifica-

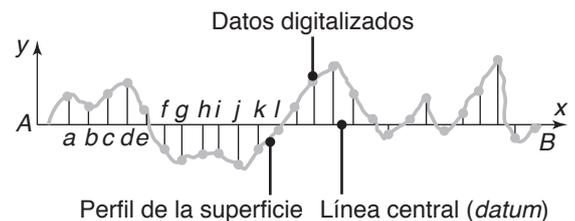


FIGURA 33.3 Coordenadas usadas para medir la rugosidad de la superficie, definida por las ecuaciones (33.1) y (33.2).

ciones técnicas para describir el método o métodos que deben usarse para inspeccionar las imperfecciones de la superficie.

Medición de la rugosidad de la superficie. Es común usar instrumentos llamados **perfilómetros de superficie** para medir y registrar la rugosidad de ésta. Un perfilómetro tiene un *estilete* o *aguja de diamante* que se mueve en línea recta sobre la superficie (figura 33.4a) y registra mediciones periódicas de la altura. La distancia que viaja la aguja se llama **recorrido**, la cual en general varía de 0.08 a 25 mm (0.003 a 1 pulg). Para la mayor parte de aplicaciones de ingeniería es común encontrar un recorrido de 0.8 mm (0.03 pulg). Una regla práctica es que el recorrido debe ser lo bastante largo para que incluya de 10 a 15 irregularidades de la rugosidad, así como todas las ondulaciones de la superficie.

Con el fin de resaltar la rugosidad, el perfilómetro traza todos sus registros con la escala vertical exagerada (algunos órdenes de magnitud más grande que la escala horizontal; vea la figura 33.4c a f); la magnitud de la escala en el instrumento de registro se llama **ganancia**. Así, el perfil registrado tiene una distorsión significativa y la superficie parecerá mucho más rugosa de lo que en realidad es. El instrumento de registro compensa cualquier ondulación de la superficie y por ello indica sólo su rugosidad.

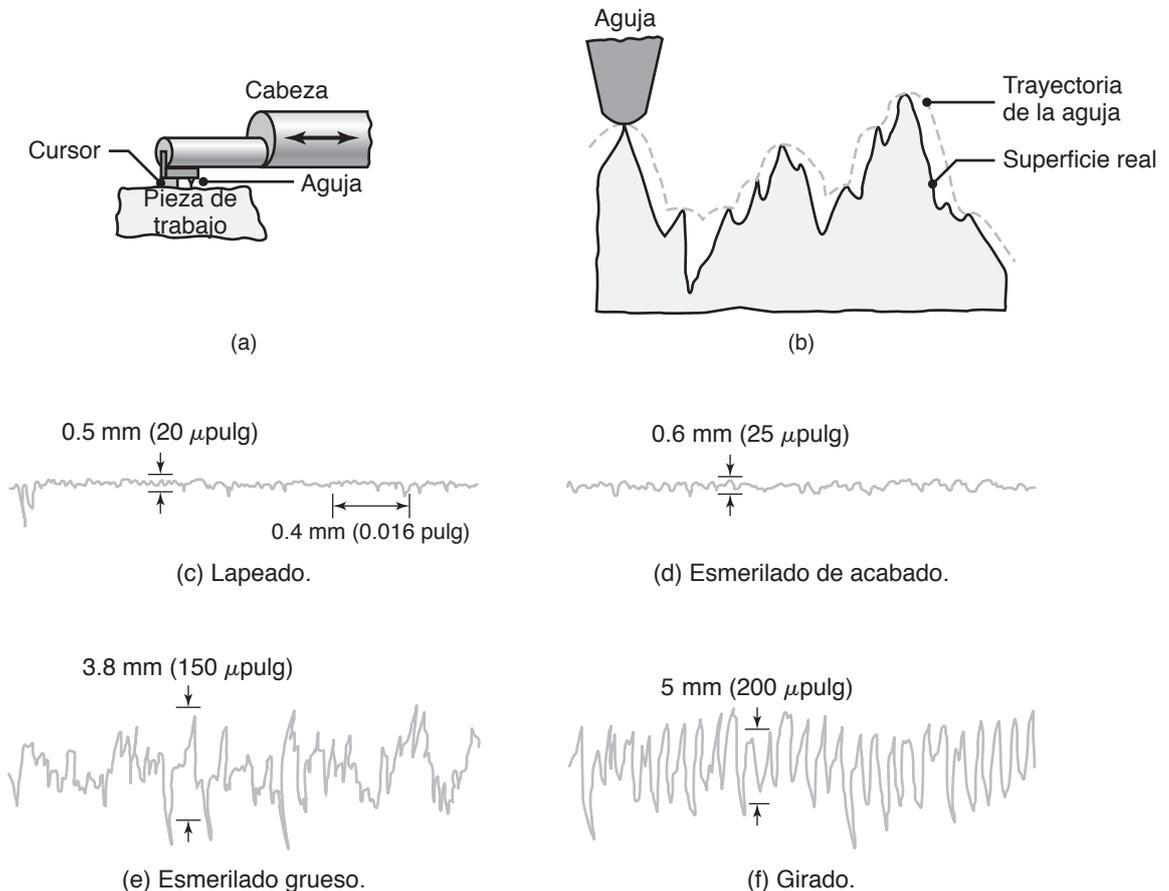


FIGURA 33.4 (a) Medición de la rugosidad de una superficie con una aguja; el cursor sostiene a la aguja y la protege contra daños. (b) Trayectoria de la aguja al hacer mediciones de la rugosidad de la superficie (línea punteada), en comparación con el perfil real de la rugosidad; note que el perfil de la trayectoria de la aguja es más suave que el de la superficie real. (c) a (f) Perfiles comunes de superficies producidas con diferentes métodos de maquinado y procesos de acabado superficial; note la diferencia entre las escalas vertical y horizontal.

Debido al radio finito de la punta de diamante de la aguja, la trayectoria de ésta es diferente de la superficie real (observe la trayectoria indicada con línea punteada en la figura 33.4b) y la rugosidad medida es menor. El diámetro de la punta de la aguja más utilizada es de $10\ \mu\text{m}$ ($400\ \mu\text{pulg}$). Cuanto más pequeño sea el diámetro de la aguja y más suave la superficie, más cerca estará la trayectoria de la aguja del perfil real de la superficie.

Medición de la superficie en tres dimensiones. Debido a que las propiedades de la superficie varían significativamente con la dirección en que el perfilómetro hace su trazo, es frecuente que haya necesidad de medir perfiles de la superficie en *tres dimensiones*. En el caso más sencillo, esto se hace con un perfilómetro que tenga la capacidad de indizar una corta distancia entre los trazos. Se han desarrollado otras alternativas, dos de las cuales son interferómetros ópticos y microscopios de fuerza atómica.

1. **Microscopios de interferencia óptica**, lanzan una luz contra una superficie reflectora y registran las bandas de interferencia que resultan de las ondas incidente y su reflejada. Esta técnica permite la medición directa de la pendiente de la superficie sobre el área de interés. A medida que cambia la distancia vertical entre la muestra y el objetivo de interferencia, también cambian los patrones de las bandas, lo que permite medir la altura de la superficie.
2. **Microscopios de fuerza atómica (AFM)**, por sus siglas en inglés, se usan para medir superficies suaves en extremo y ciertos arreglos tienen la capacidad de distinguir átomos sobre superficies con suavidad en escala atómica. En principio, un AFM sólo es un perfilómetro de superficie muy fina con un láser que se usa para medir la posición de la sonda. El perfil de la superficie se mide con gran exactitud y con una resolución vertical en escala atómica; las áreas barridas son del orden de $100\ \mu\text{m}^2$, aunque son más comunes áreas más pequeñas.

Rugosidad de la superficie en la práctica de la ingeniería. Los requerimientos de diseño para la rugosidad de la superficie en las aplicaciones comunes de ingeniería varían hasta en dos órdenes de magnitud. Algunos ejemplos son los siguientes:

- | | |
|---|--|
| • Rodamientos de bolas | $0.025\ \mu\text{m}$ ($1\ \mu\text{pulg}$). |
| • Rodamientos de cigüeñales | $0.032\ \mu\text{m}$ ($13\ \mu\text{pulg}$). |
| • Tambores de frenos | $1.6\ \mu\text{m}$ ($63\ \mu\text{pulg}$). |
| • Caras de discos de embragues | $3.2\ \mu\text{m}$ ($125\ \mu\text{pulg}$). |
| • Aparatos de calibración e instrumentos de precisión | $0.02\ \mu\text{m}$ ($0.8\ \mu\text{pulg}$). |

33.4 Fricción

La *fricción* juega un rol importante en los procesos de manufactura debido al movimiento relativo y a las fuerzas de fricción que siempre están presentes entre las herramientas, los dados y las interfases entre las piezas de trabajo. La fricción (a) *disipa energía*, la cual genera calor, que puede tener efectos perjudiciales en la operación y (b) *impide la libertad de movimiento* en las interfases, lo que afecta significativamente el flujo y la deformación de los materiales en los procesos del trabajo de metales. Sin embargo, la fricción no siempre es indeseable; por ejemplo, sin fricción sería imposible el laminado de metales, el flujo del control del material en las operaciones de corte y moldeo, la sujeción de las piezas en las máquinas o la colocación de brocas en el plato de sujeción.

Ha habido varias explicaciones de la fricción. Una teoría comúnmente aceptada para la fricción es la **teoría de la adhesión**; se basa en la observación de que dos superficies limpias y secas, sin importar qué tan suaves estén, se tocan en sólo una fracción de su área aparente de contacto (figura 33.5). La pendiente máxima de las superficies reales

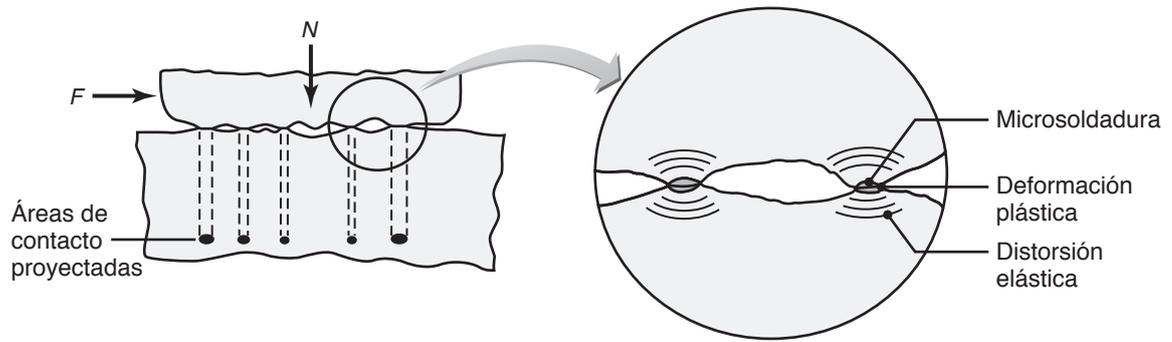


FIGURA 33.5 Ilustración esquemática de la interfase de dos cuerpos en contacto, se muestran las áreas reales de contacto en las asperezas; en las superficies de ingeniería, la razón de las áreas aparente a real de contacto llegan a ser tan grandes como de 4 a 5 órdenes de magnitud.

varía normalmente entre 5° y 15° , a menos que se manufacturen con toda intención para que tengan una alta rugosidad. En una situación así, la carga normal (contacto), N , es soportada por **asperezas** diminutas, que son pequeñas proyecciones desde la superficie que están en contacto entre sí. Por tanto, las tensiones normales en dichas asperezas son grandes y por ello causan *deformación plástica* en las uniones, lo que crea una *unión adhesiva*. En otras palabras, las asperezas forman soldaduras microscópicas y se necesita cierta fuerza para vencerlas por cizallamiento. El proceso de soldadura por presión en frío (vea la sección 31.2), por ejemplo, se basa en este principio.

Otra teoría de la fricción es la **teoría de la abrasión**; se basa en el concepto de que una aspereza en una superficie dura (como una herramienta o un dado) *penetra* o *ara* una superficie más suave (la pieza de trabajo), como se vio en la sección 26.3. La penetración o arado causará el desplazamiento del material o producirá pequeños fragmentos o astillas, como en el proceso de limado. En las dos situaciones descritas antes, el deslizamiento entre dos cuerpos en contacto es posible sólo si se aplica una *fuerza tangencial*; ésta es la **fuerza de fricción**, F , requerida para cizallar las intersecciones o *penetrar* en el material más suave.

La razón F/N (figura 33.5) es el **coeficiente de fricción**, μ . En función de los materiales y procesos implicados, el valor de μ en los procesos de manufactura varía de manera importante. Por ejemplo, en los procesos de formado de metal es común que esté entre cerca de 0.03 pulg en el trabajo en frío a alrededor de 0.7 pulg en el trabajo en caliente, y de 0.5 a 2 en las operaciones de maquinado.

Casi toda la energía disipada en vencer la fricción se convierte en *calor*, lo cual eleva la temperatura de la superficie; una pequeña fracción de la energía se convierte en *energía almacenada* (vea la sección 1.6) en las superficies deformadas plásticamente. La temperatura se incrementa (a) con el aumento de la fricción y la velocidad de deslizamiento; (b) con la disminución de la conductividad térmica y (c) con la reducción del calor específico de los materiales que se deslizan (vea también la sección 21.4). La temperatura de la interfase puede ser tan alta que llegue a reblandecer e incluso fundir las superficies y, posiblemente, causar cambios microestructurales en los materiales involucrados. También observe que la temperatura afecta la viscosidad y otras propiedades de los lubricantes y que temperaturas muy altas pueden ocasionar que el lubricante falle.

Fricción de los plásticos. Debido a que su resistencia es baja en comparación con la de los metales (tablas 2.2 y 7.1), los *plásticos* por lo general poseen malas características de fricción, en especial las poliimididas, poliésteres y fluorocarbonos (*Teflón*). Esta propiedad hace que los plásticos sean mejores para fabricar rodamientos, engranes, sellos, uniones de prótesis y aplicaciones reductoras de la fricción en general, siempre y cuando las cargas no sean elevadas. Por esta característica, a los polímeros en ocasiones se les describe como *autolubricantes*.

Por lo general los factores involucrados en la fricción de los metales también son aplicables a los polímeros. En el deslizamiento de termoplásticos y elastómeros, la componente de penetración (arado) de la fricción es un factor significativo debido a su comportamiento viscoelástico (es decir, presentan comportamiento tanto viscoso como elástico) y la subsecuente pérdida de histéresis (vea la figura 7.14). Esta condición se simula fácilmente al arrastrar un clavo mellado a través de una superficie de caucho y observar cómo éste recupera su forma rápidamente.

Un factor importante en las aplicaciones de los plásticos es el efecto del aumento de temperatura en las interfases deslizantes causado por la fricción. Como se describe en la sección 7.3, los termoplásticos pierden rápido su resistencia y se ablandan a medida que la temperatura aumenta. Por tanto, si no se controla el aumento de temperatura, las superficies deslizantes sufren una deformación permanente y degradación térmica. El comportamiento ante la fricción de varios polímeros sobre metales es semejante al de metales sobre metales. La muy conocida poca fricción del Teflón se ha atribuido a su estructura molecular, la cual no reacciona con los metales; en consecuencia, su adhesión es mala y su fricción es baja.

Fricción de los cerámicos. La mecánica de la fricción en los cerámicos es semejante a la de los metales; por tanto, también en los cerámicos la adhesión y el arado en las interfases contribuyen a la fuerza de fricción. Sin embargo, la adhesión suele ser menos importante con los cerámicos debido a su gran dureza (vea la figura 2.15), por lo que el área real de contacto en las superficies deslizantes es pequeña. La abrasión y la penetración o arado son significativas, en especial cuando el cerámico tiene una interfase con materiales más blandos.

Reducción de la fricción. La fricción se reduce sobre todo por medio de (a) la selección de materiales que tengan poca adhesión, como los carburos y cerámicos, y (b) el uso de películas y recubrimientos superficiales. Los *lubricantes* (como los aceites) o películas sólidas (como el grafito) interponen una capa adherente entre la herramienta, el dado y la pieza de trabajo, lo que minimiza la adhesión y las interacciones entre dos cuerpos deslizantes. La fricción también se reduce mucho si se sujeta la interfase de la herramienta o dado-pieza de trabajo, a *vibraciones ultrasónicas*, por lo común a 20 kHz. La amplitud de las vibraciones separa periódicamente las dos superficies, lo que permite que el lubricante fluya con más libertad hacia la interfase.

Mediciones de la fricción. El coeficiente de fricción se suele determinar en forma experimental, ya sea durante un proceso real de manufactura o en pruebas simuladas en laboratorio utilizando especímenes de pequeña escala de varias formas. La **prueba de compresión de anillo** ha ganado mucha aceptación, en particular para los procesos de deformación volumétricos. Un anillo plano se recalca plásticamente entre dos placas planas (figura 33.6a). Conforme se reduce su altura, el anillo se expande radialmente hacia fuera. Si la fricción en las interfases es cero, los diámetros tanto interior como exterior del anillo se expanden como si fuera un disco sólido. Sin embargo, con el incremento de la fricción el diámetro interno se hace más pequeño. Para una reducción particular de la altura, hay una fricción crítica con la que el diámetro interno aumenta a partir de su diámetro original si μ es menor, y disminuye si μ es mayor (figura 33.6b).

El coeficiente de la fricción se puede determinar con la medición del cambio del diámetro interno del espécimen y el uso de las curvas que se muestran en la figura 33.7 (obtenidas con análisis teóricos). Observe que cada geometría de anillo y material tiene su propio conjunto específico de curvas; la geometría más común de un espécimen tiene una proporción de diámetro externo/diámetro interno/altura de 6:3:2. En estas pruebas el tamaño real del espécimen suele no ser relevante. Así, una vez que se conoce el porcentaje de reducción del diámetro interno y de la altura, se determina la magnitud de μ a partir de la gráfica apropiada.

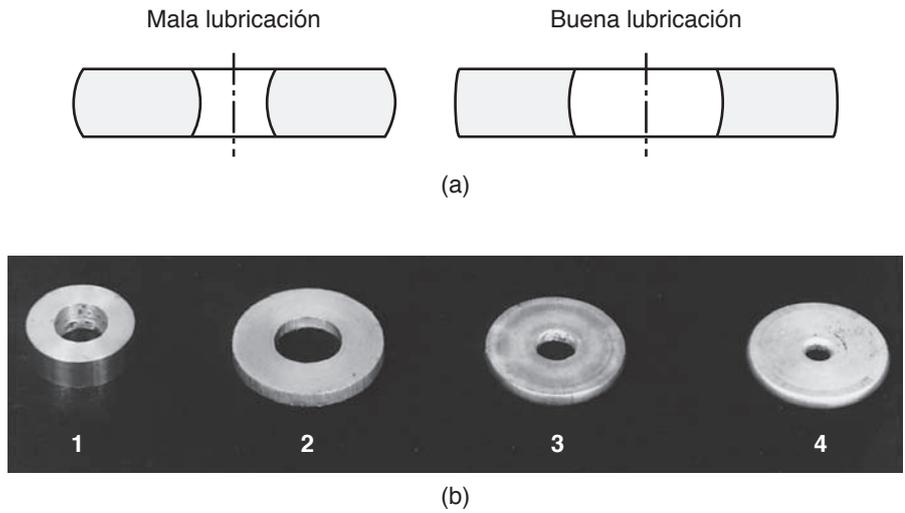


FIGURA 33.6 Prueba de compresión de anillo entre troqueles planos. (a) Efecto de la lubricación en el tipo de anillo preparado. (b) Resultados de la prueba: (1) espécimen original, (2) a (4) fricción creciente. Fuente: Basado en A. T. Male y M. G. Cockroft.

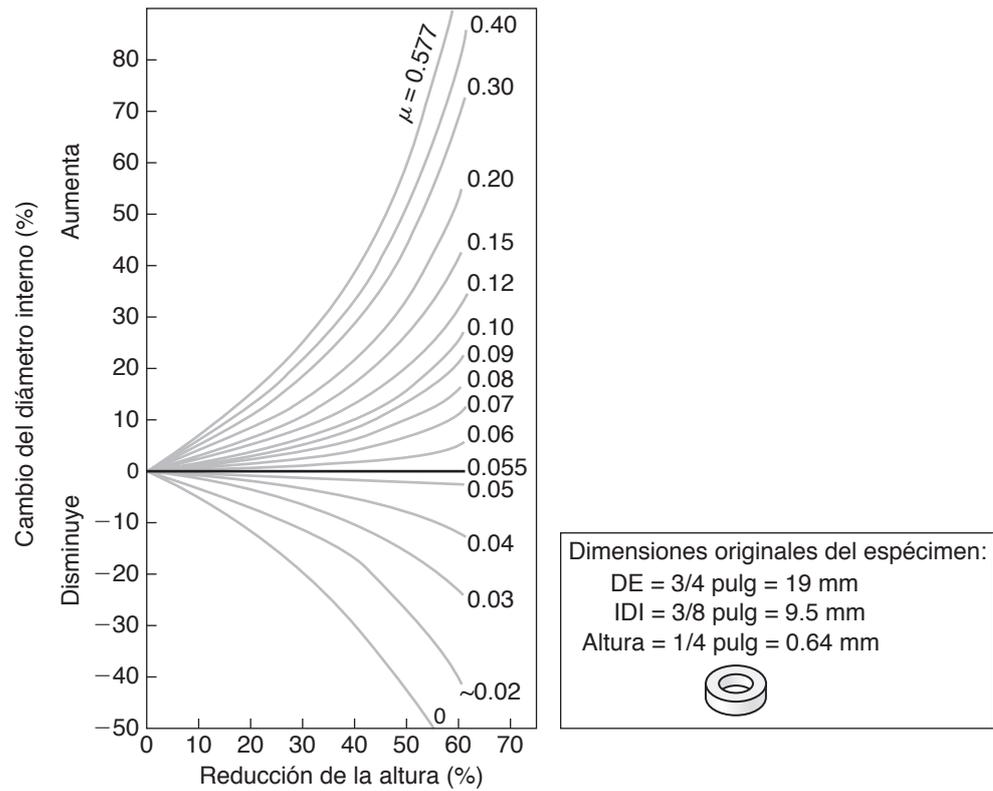


FIGURA 33.7 Gráfica para determinar el coeficiente de fricción a partir de una prueba de compresión de anillo. Se miden la reducción de la altura y el cambio del diámetro interno del anillo, después se lee el valor de μ directamente de esta gráfica; por ejemplo, si el espécimen de anillo redujo su altura en 40% y su diámetro interno en 10%, el coeficiente de fricción es de 0.10.

EJEMPLO 33.1 Determinación del coeficiente de fricción

Dado: En una prueba de compresión de anillo, un espécimen con altura de 10 mm, diámetro exterior (DE) de 30 mm y diámetro interior (DI) de 15 mm, redujo su espesor 50 por ciento.

Se solicita: Determinar el coeficiente de fricción, μ , si el DE mide 38.9 mm después de la deformación.

Respuesta: Primero es necesario determinar el nuevo DI (que se obtiene a partir de la constancia del volumen) como sigue:

$$\begin{aligned}\text{Volumen} &= \frac{\pi}{4}(30^2 - 15^2)(10) \\ &= \frac{\pi}{4}(38.9^2 - \text{DI}^2)(5).\end{aligned}$$

De esta ecuación, el nuevo DI se calcula como 12.77 mm. Entonces, el cambio en el diámetro interno es

$$\begin{aligned}\Delta\text{DI} &= \frac{12.77 - 15}{15} \\ &= -0.1487, \text{ o } 14.87\% \text{ (disminuye)}.\end{aligned}$$

Con una reducción de 50% en la altura y una disminución de 14.87% del diámetro interno, el coeficiente de fricción se obtiene a partir de la figura 33.7 y es $\mu = 0.09$.

33.5 Desgaste

La importancia del *desgaste* es evidente en la cantidad de partes y componentes que continuamente tienen que reemplazarse o repararse en una amplia variedad de productos para el consumidor y comerciales. Las *placas de desgaste* se colocan en dados y mecanismos deslizantes en los que hay cargas grandes, son un componente importante en cierta maquinaria de trabajo de metales. Estas placas, también conocidas como partes de desgaste, se espera que se gasten, pero se pueden reemplazar con facilidad y así se impiden reparaciones costosas.

Aunque el desgaste por lo general altera la topografía de la superficie de una parte, y puede ocasionar un daño grave a ésta, también puede tener un efecto benéfico. El periodo de *funcionamiento* de los motores produce partículas pequeñas de desgaste mientras que elimina los picos de las asperezas, como puede verse en la figura 33.8. De este modo, en condiciones controladas el desgaste puede verse como un tipo de proceso de suavizado o de pulido. También observe que escribir con un lápiz o gis común es un proceso de desgaste y las palabras escritas en realidad consisten en partículas del desgaste.

A continuación se describen los mecanismos básicos del desgaste que son relevantes para las operaciones de manufactura.

Desgaste adhesivo. Si se aplica una fuerza tangencial al modelo que se muestra en la figura 33.9, el esfuerzo cortante puede tener lugar ya sea (a) en la interfase original de los dos cuerpos o (b) a lo largo de una trayectoria o por arriba de la interfase; en cualquier caso el deslizamiento causa *desgaste adhesivo*, también llamado *desgaste por deslizamiento*. Debido a factores como el endurecimiento por deformación en los contactos de las asperezas, la difusión entre los dos cuerpos y la solubilidad sólida mutua (sección 4.3) de los materiales involucrados, con frecuencia las uniones adhesivas que se forman en la unión de las asperezas son más fuertes que los metales base en sí. En consecuencia, durante el deslizamiento las fracturas suelen seguir una trayectoria en el componente más débil o blando y así es como se genera un fragmento de desgaste. Aunque es común que este fragmento esté unido al componente más duro (la superficie superior en la figura 33.9c), eventualmente se desprende durante el deslizamiento continuado en la interfase y se desarrolla como una **partícula de desgaste**.

En condiciones más duras, como las que ocurren con grandes cargas normales y asperezas unidas con fuerza, el desgaste adhesivo recibe el nombre de *rayones*, *manchas*, *desgarres*, *escoriaciones* o *amarramiento* (gripado) y se le llama **desgaste severo**. Sin embargo, las capas de óxido en las superficies tienen una gran influencia en el desgaste adhesivo, pues en ocasiones actúan como película protectora, lo que resulta en un desgaste suave que consiste en pequeñas partículas de desgaste.

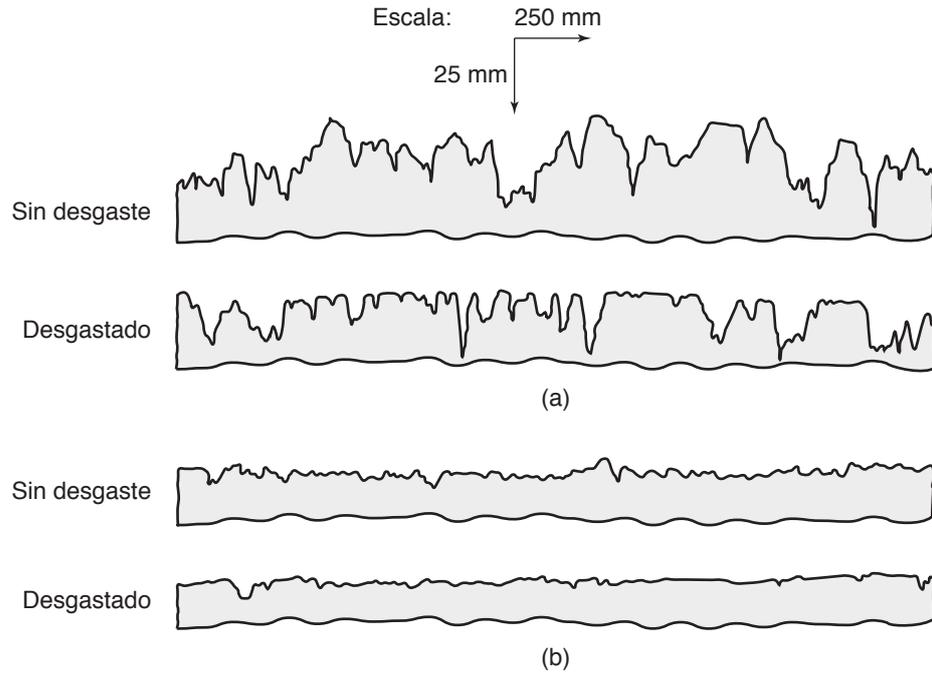


FIGURA 33.8 Cambios en los perfiles originales después del desgaste, (a) cepillado con alambre y (b) rectificado; note la diferencia en las escalas vertical y horizontal. Fuente: Basado en E. Wild y K. J. Mack.

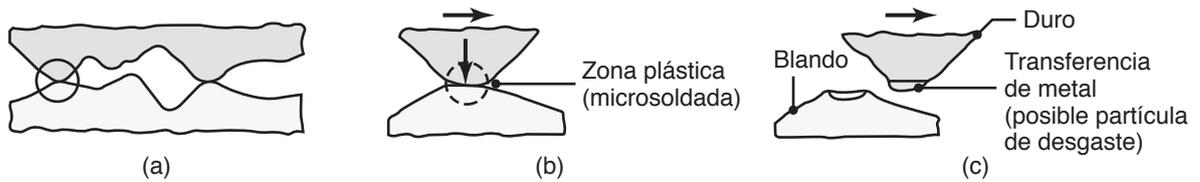


FIGURA 33.9 Ilustración esquemática de (a) dos asperezas en contacto, (b) adhesión entre dos asperezas y (c) la formación de una partícula de desgaste.

El desgaste adhesivo se puede reducir con uno o más de los siguientes métodos:

1. Seleccionar materiales que no desarrollen uniones adhesivas fuertes.
2. Usar un material más duro como un miembro de la pareja.
3. Utilizar materiales que se oxiden con facilidad.
4. Aplicar recubrimientos duros (vea el capítulo 34).
5. Recubrir una superficie con un material más blando, como estaño, plata, plomo o cadmio.
6. Usar un lubricante apropiado.

Desgaste abrasivo. Este tipo de desgaste es causado por una superficie dura y rugosa, o por una que tenga partículas duras afiladas, que se deslice a lo largo de otra superficie. El resultado es que se producen *microchips* o *astillas* como partículas de desgaste que dejan muescas o rayas en la superficie más suave (figura 33.10). Actúan de esta manera procesos como el limado, esmerinado, maquinado ultrasónico y el maquinado por chorro abrasivo o por chorro de agua y abrasivos. A diferencia del desgaste, que por lo general no es buscado ni deseable, los parámetros en estos procesos se *controlan* para producir las superficies deseadas y cambios de forma a través del mecanismo de desgaste.

Hay dos tipos básicos de desgaste abrasivo. En el **desgaste de dos cuerpos**, la acción abrasiva tiene lugar entre dos superficies deslizantes o entre partículas abrasivas (duras) y un cuerpo sólido. Este tipo de desgaste es la base del **desgaste erosivo**, como ocurre en el movimiento de lodos a través de tubos o de partículas de arena que actúan sobre la hélice de un barco. En el **desgaste de tres cuerpos**, una partícula abrasiva está presente entre dos cuerpos sólidos que se deslizan, como una partícula de desgaste (contaminante) que es transportada por un lubricante. Una situación así indica la importancia de filtrar apropiada y periódicamente los lubricantes en las operaciones de trabajo de metales, así como en la maquinaria y en motores de automóviles, aviones y helicópteros.

Se ha descubierto que la **resistencia al desgaste abrasivo** de los metales puros y los cerámicos es directamente proporcional a su dureza. Así, el desgaste abrasivo se puede reducir aumentando la dureza de los materiales (por lo general con un tratamiento térmico) o reduciendo la carga normal. Los elastómeros y cauchos resisten bien el desgaste abrasivo debido a que se *deforman elásticamente* y luego se recuperan cuando las partículas abrasivas han pasado sobre sus superficies. El mejor ejemplo es una llanta de automóvil, que dura miles de kilómetros aunque opere en las superficies de carreteras pavimentadas o sin pavimentar, que generalmente son ásperas y abrasivas; ni siquiera los aceros endurecidos durarían mucho en esas condiciones.

Desgaste corrosivo (o corrosión desgaste). También conocido como *desgaste por oxidación* o *desgaste químico*, este tipo de desgaste es causado por reacciones químicas y electroquímicas entre la superficie y el ambiente. En este caso, son productos corrosivos finos presentes en la superficie los que constituyen las partículas de desgaste. Cuando la capa corrosiva es destruida o eliminada con el deslizamiento o abrasión, comienza a formarse otra capa y se repite el proceso de remoción y formación de la capa corrosiva. Entre los medios corrosivos se encuentran el agua, agua de mar, oxígeno, ácidos, productos químicos, sulfuro de hidrógeno atmosférico y dióxido de sulfuro.

El desgaste corrosivo puede reducirse si se:

- Seleccionan materiales que resistan el ataque ambiental.
- Aplica un recubrimiento.
- Controla el ambiente.
- Reducen las temperaturas de operación con el fin de disminuir la tasa de reacción química.

Desgaste por fatiga. El desgaste por fatiga, también llamado *fatiga de la superficie* o *desgaste por fractura de la superficie*, se ocasiona cuando las superficies están sujetas a una carga cíclica, como el contacto por rodamiento en los baleros o en las operaciones de forjado. Las partículas de desgaste se suelen formar mediante el mecanismo de *descascarar* o *formación de picaduras*. La **fatiga térmica** es otro tipo de desgaste por fatiga, con la que se generan grietas en la superficie debido a los esfuerzos térmicos en el ciclado térmico, como cuando un dado frío se pone en contacto repetidas veces con piezas de trabajo calientes. Las grietas individuales se unen una con otra y la superficie comienza a descascararse, fenómeno semejante al desarrollo de baches en los caminos. La fatiga térmica da como resultado el *agrietamiento térmico* de los moldes y dados en la fundición por inyección y en las operaciones de trabajo en caliente.

El desgaste por fatiga se puede reducir con las siguientes acciones:

- Disminución de los esfuerzos de contacto.
- Reducción de los ciclos térmicos.
- Mejora de la calidad de los materiales por medio del retiro de impurezas, inclusiones y otras imperfecciones que actúan como puntos locales de inicio y propagación de grietas.

En las operaciones de manufactura se observan otros tipos de desgaste:

- **Erosión**, causada por partículas sueltas que frotan una superficie.
- **Tribocorrosión**, cuando las interfases están sujetas a movimientos recíprocos muy pequeños.

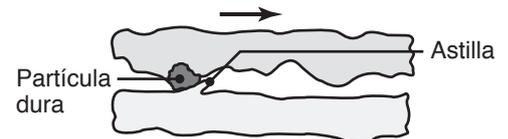


FIGURA 33.10 Ilustración esquemática del desgaste abrasivo en el deslizamiento; los rayones longitudinales en una superficie por lo general indican desgaste abrasivo.

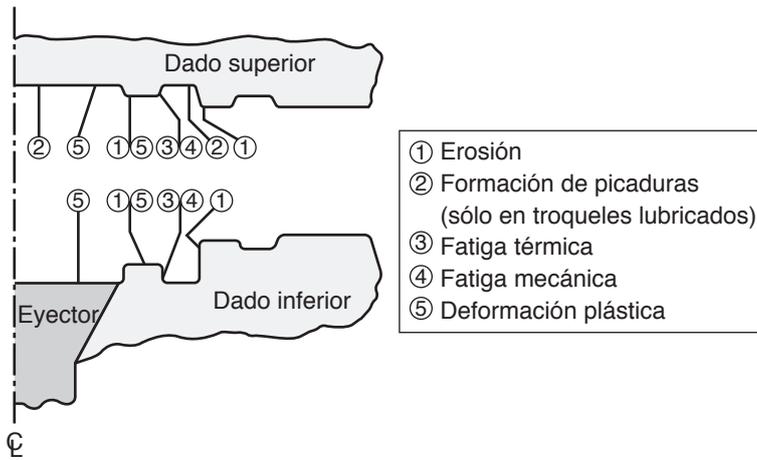


FIGURA 33.11 Tipos de desgaste observados en la cavidad de un par de dados usado para la forja y estampado. Fuente: Basado en T. A. Dean.

- **Desgaste por impacto**, que es la remoción de cantidades muy pequeñas de material de una superficie por la acción del impacto de partículas, semejante al mecanismo de maquinado ultrasónico (sección 26.6).

En muchas situaciones de manufactura, el desgaste del componente es resultado de una combinación de diferentes tipos de desgaste. Por ejemplo, en la figura 33.11 observe que incluso en el mismo dado de estampado tienen lugar varios tipos de desgaste en diferentes ubicaciones de la cavidad. Una situación parecida ocurre también en las herramientas de corte, como se ilustra en la figura 21.18.

Desgaste de los termoplásticos. El comportamiento del desgaste de los termoplásticos es semejante al de los metales. Su comporta-

miento ante el desgaste abrasivo depende en parte de la capacidad del polímero para deformarse y recuperarse elásticamente, como en el caso del caucho y los elastómeros. Los polímeros comunes con buena resistencia al desgaste son las poliimidas, el nailon, policarbonato, polipropileno, acetales y polietileno de alta densidad. Estos polímeros se moldean o maquinan para fabricar engranes, poleas, piñones y otros componentes mecánicos similares. Debido a que los termoplásticos pueden fabricarse con una amplia variedad de composiciones, también se pueden mezclar con lubricantes internos (como el politetrafluoretileno, silicio, grafito, disulfuro de molibdeno y partículas de caucho) que se dispersan en la matriz del polímero.

Desgaste de plásticos reforzados. La resistencia de los plásticos reforzados al desgaste depende del tipo, cantidad y dirección del refuerzo de la matriz del polímero (vea el capítulo 9); el carbono, vidrio y fibras de aramida mejoran la resistencia al desgaste. El desgaste suele presentarse cuando las fibras son expulsadas de la matriz, lo que se conoce como *expulsión de fibra*. El desgaste es mayor cuando la dirección de deslizamiento es paralela a las fibras, porque se puede tirar de ellas con mayor facilidad. Las fibras largas incrementan la resistencia al desgaste de los compósitos porque (a) son más difíciles de expulsar e (b) impiden que las grietas presentes en la matriz se propaguen a la superficie.

Desgaste de los cerámicos. Cuando los cerámicos se deslizan contra metales, el desgaste es causado por (a) deformación (plástica) en pequeña escala y fractura de la superficie (frágil); (b) penetración; (c) fatiga y (d) reacciones químicas en la superficie. Cuando se deslizan unos contra otros, se transfiere material de la superficie de un cuerpo metálico a la superficie del cerámico de tipo óxido, lo que forma óxidos del metal. Así, el deslizamiento en realidad tiene lugar entre el metal y una superficie de óxido metálico.

33.6 Lubricación

La lubricación se utiliza para reducir la fricción y el desgaste y se remonta a cerca de cuatro milenios. Por ejemplo, en 1400 a. C., las ruedas de los carruajes egipcios se lubricaban con grasa de res. Alrededor del 600 d. C., se usaban varios aceites para la lubricación durante las operaciones del trabajo de metales (vea la tabla I.2).

Como se ha dicho en varios capítulos de este libro, las superficies de las herramientas, moldes, dados y piezas de trabajo, están sujetas a (a) fuerzas y presión de contacto, que van desde muy débiles a varias veces el límite de elasticidad del material de la pieza de trabajo; (b) velocidad relativa, de muy baja a muy alta, y (c) temperatura, que por lo general

varía de la del ambiente a la de fusión. Además de seleccionar los materiales apropiados y controlar los parámetros del proceso para reducir la fricción y el desgaste, se aplican **lubricantes** o, más en general, **fluidos para el trabajo de metales**.

Regímenes de lubricación. Hay cuatro tipos de regímenes de lubricación que generalmente son de interés en las operaciones de manufactura (figura 33.12):

1. **Lubricación por película gruesa:** las superficies están separadas completamente por una película de lubricante y un factor importante es la viscosidad de éste. Dichas películas se desarrollan en ciertas regiones de la pieza de trabajo en las operaciones de alta velocidad y también a partir de lubricantes de mucha viscosidad que quedan atrapados en las interfases del dado y la pieza de trabajo. Una película gruesa de lubricante da como resultado una superficie de aspecto apagado y granular en la pieza de trabajo después de las operaciones de formado, con el grado de rugosidad variable según el tamaño del grano. En operaciones como la fabricación de monedas y el estampado de precisión, los lubricantes atrapados son indeseables; impiden que el material original llene por completo la cavidad del dado.
2. **Lubricación por película delgada:** a medida que aumenta la carga entre el dado y la pieza de trabajo, o que disminuyen la velocidad y viscosidad del fluido de trabajo del metal, la película de lubricante se hace más delgada y el proceso se conoce como **lubricación por película delgada**. Esta condición eleva la fricción en las interfases deslizantes y da como resultado un desgaste ligero.
3. **Lubricación mixta:** una parte significativa de la carga la soporta el contacto físico entre las asperezas de las dos superficies que se tocan. El resto de la carga recae en la película de fluido atrapado en las cavidades, como los valles entre las asperezas.
4. **Lubricación de frontera:** la carga la soportan las superficies de contacto que están cubiertas por una *película de frontera* de lubricante (figura 33.12d), la cual es una capa molecular delgada de lubricante. La película es atraída por las superficies del metal e impide el contacto directo de metal contra metal de los dos cuerpos, lo que reduce el desgaste. Los lubricantes de frontera comunes son aceites naturales, grasas, ácidos grasos, esterres o jabones. Sin embargo, las películas de frontera se pueden *romper* (a) como resultado de la desorción causada por las altas temperaturas desarrolladas en las superficies deslizantes o (b) por la fricción durante el deslizamiento. Al eliminarse esta película protectora, las superficies metálicas deslizantes comienzan a desgastarse y también puede haber formación severa de muescas.

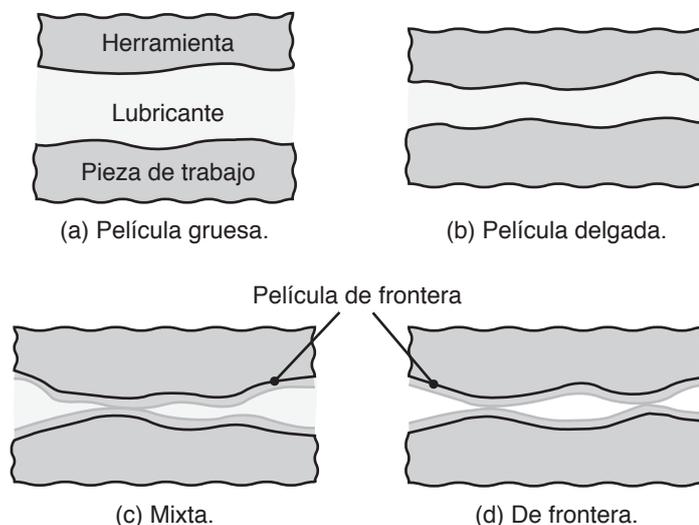


FIGURA 33.12 Regímenes de lubricación que generalmente ocurren en las operaciones de trabajo de metales. *Fuente:* Basado en W. R. D. Wilson.

Otras consideraciones. Observe que los valles en la superficie de los cuerpos en contacto (vea las figuras 33.2a, 33.4 y 33.5) sirven como almacenes locales o bolsas de lubricantes, con lo cual soportan una parte sustancial de la carga. La pieza de trabajo, pero no el dado, debe tener la superficie más áspera; conforme la pieza de trabajo se deforma plásticamente, su superficie es aplanada por las herramientas y el lubricante se libera o *percola* desde la superficie. Si la superficie más dura del dado es áspera, no hay efecto de percolación y las asperezas, que actúan como filtro, pueden dañar la superficie de la pieza de trabajo. La rugosidad superficial recomendada en la mayor parte de los dados es de alrededor de $0.4 \mu\text{m}$ ($15 \mu\text{pulg}$).

La *geometría* conjunta de los cuerpos que interactúan es una consideración importante para garantizar una lubricación apropiada. El movimiento de la pieza de trabajo en la zona de deformación, como ocurre durante el trefilado, extrusión y rolado, debe permitir que el suministro de lubricante llegue a la interfase del dado y la pieza de trabajo.

33.7 Fluidos en el trabajo de metales y su selección

Las funciones de un *fluido para el trabajo de metales* son para:

- *Reducir la fricción*, lo que disminuye los requerimientos de fuerza y energía y cualquier aumento de la temperatura.
- *Disminuir el desgaste*, lo que reduce amarres y raspaduras.
- *Mejorar el flujo de material* en las herramientas, dados y moldes.
- Actuar como *barrera térmica* entre la pieza de trabajo y las superficies de las herramientas y dados, lo que impide que la pieza de trabajo se enfríe en los procesos de trabajo en caliente.
- Actuar como *agente de liberación o partición*, una sustancia que ayuda a remover o expulsar las partes de dados y moldes.

Actualmente hay varios tipos de fluidos para el trabajo de metales con diferentes comportamientos químicos, propiedades y características que cumplen con estos requerimientos (vea también la sección 22.12 acerca de los fluidos de corte).

33.7.1 Aceites

Los *aceites* mantienen una película de alta resistencia sobre la superficie de un metal, como es fácil observar si se intenta limpiar una superficie aceitosa. Aunque son muy eficaces para reducir la fricción y el desgaste, los aceites tienen muy poca conductividad térmica y bajo calor específico. En consecuencia, no conducen con eficacia el calor generado por la fricción y la deformación plástica durante el procesamiento. Además, es difícil y costoso eliminar los aceites de las superficies de los componentes que se vayan a pintar o soldar (vea la sección 34.16).

Las fuentes de los aceites son (a) **minerales** (*petróleo* o *hidrocarburos*), (b) **animales** o (c) **vegetales**. Los aceites pueden *componerse* con ciertos aditivos o con otros aceites. La composición se usa para cambiar propiedades como el comportamiento viscosidad-temperatura, tensión superficial, resistencia al calor y características de la capa de frontera.

33.7.2 Emulsiones

Una *emulsión* es una mezcla de dos líquidos inmiscibles (por lo general aceite y agua, en diferentes proporciones) con algunos aditivos. Los *emulsionantes* son sustancias que impiden que las gotas dispersas de una mezcla se unifiquen, de ahí el término inmiscible. Las emulsiones tienen apariencia lechosa, también se les conoce como **aceites solubles en agua** o **refrigerantes basados en agua**, y son de dos tipos. En la *emulsión indirecta* las gotas de agua se encuentran dispersas en el aceite. En la *emulsión directa*, el aceite mine-

ral está disperso en agua en forma de gotas muy pequeñas. Las emulsiones directas son fluidos importantes en el trabajo de metales, ya que la presencia de agua les da una gran capacidad de enfriamiento. Son eficaces en particular en el maquinado de alta velocidad (sección 25.5), en el que un severo aumento de temperatura tiene efectos perjudiciales en la vida de las herramientas, la integridad de las superficies de las piezas de trabajo y la exactitud dimensional de las partes.

33.7.3 Soluciones sintéticas y semisintéticas

Las *soluciones sintéticas* son fluidos químicos que contienen productos químicos inorgánicos y de otro tipo disueltos en agua; no contienen aceites minerales. Se agregan agentes químicos para darles varias propiedades. Las soluciones semisintéticas son básicamente soluciones sintéticas a las que se han agregado pequeñas cantidades de aceites emulsificables.

33.7.4 Jabones, grasas y ceras

Los *jabones* son comúnmente productos reactivos de sales de sodio o potasio con ácidos grasos. Los jabones alcalinos son solubles en agua, pero otros para metal por lo general son insolubles. Los jabones son lubricantes de frontera eficaces y forman capas gruesas en las interfases entre los dados y la pieza de trabajo, en particular cuando se emplean sobre recubrimientos de conversión para aplicaciones de trabajo de metales en frío (sección 34.10).

Las *grasas* son lubricantes sólidos o semisólidos y por lo general consisten en jabones, aceite mineral y varios aditivos. Son muy viscosas y se adhieren bien a las superficies metálicas. Aunque se usan mucho en la maquinaria, las grasas son de empleo limitado en los procesos de manufactura. Las *ceras* son de origen animal o vegetal (*parafina*). En comparación con las grasas son menos “grasosas” y más quebradizas. Las ceras son de uso limitado en las operaciones de trabajo de metales, excepto como lubricantes para el cobre y en forma de parafina clorada, así como para aceros inoxidable y aleaciones de alta temperatura.

33.7.5 Aditivos

Los fluidos para el trabajo de metales suelen estar *mezclados* con varios aditivos, incluyendo inhibidores de la oxidación, agentes que impiden la herrumbre, inhibidores de espuma, agentes humectantes y antisépticos.

Azufre, cloro y fósforo son aditivos importantes para los aceites. Se conocen como **aditivos de presión extrema** (EP, por *extreme-pressure*) y se usan ya sea solos o en combinaciones; reaccionan químicamente con las superficies metálicas y forman películas superficiales adhesivas de sulfuros y cloruros metálicos. Estas películas tienen poca resistencia al esfuerzo cortante y buenas propiedades antisoldadura, por lo que reducen con eficacia la fricción y el desgaste. Sin embargo, atacan preferentemente al aglutinante de cobalto en las herramientas y dados de carburo de tungsteno (por medio de *lixiviación selectiva*), lo que causa cambios en la rugosidad e integridad de la superficie de dichas herramientas (vea la sección 22.4).

33.7.6 Lubricantes sólidos

Por sus propiedades y características únicas, varios materiales sólidos se usan como lubricantes en las operaciones de manufactura.

Grafito. En la sección 8.6 se describieron las propiedades generales del grafito. El grafito es débil ante el esfuerzo de cizallamiento o cortante en dirección de sus *planos basales* (vea la figura 1.4), por lo que tiene un bajo coeficiente de fricción en esa dirección. Es un lubricante sólido eficaz, en particular a temperaturas elevadas; sin embargo, la fricción es baja sólo en presencia de aire o humedad. En otro caso la fricción es muy alta;

en realidad, el grafito puede ser abrasivo. Se puede aplicar ya sea por frotamiento en las superficies o como parte de una suspensión (dispersión de pequeñas partículas) *coloidal* en un líquido portador, como agua, aceite o alcohol.

Disulfuro de molibdeno. De amplio uso, el disulfuro de molibdeno (MoS_2) es un lubricante sólido laminar, tiene un aspecto algo parecido al del grafito. Sin embargo, a diferencia de éste tiene un coeficiente de fricción alto en condiciones ambientales normales. El disulfuro de molibdeno se utiliza como portador para aceites; es común que se aplique por frotación sobre la superficie de la pieza de trabajo.

Películas metálicas y de polímero. Debido a su poca resistencia, las capas delgadas de metales blandos y recubrimientos de polímero también se utilizan como lubricantes sólidos. Los metales adecuados para ello incluyen al plomo, indio, cadmio, estaño y plata; también se emplean polímeros como el politetrafluoretileno, polietileno y metacrilatos. Estos recubrimientos tienen aplicaciones limitadas debido a su falta de resistencia a grandes tensiones por contacto, en especial a temperaturas elevadas.

También se usan metales blandos para recubrir metales de alta resistencia, como aceros, aceros inoxidable y aleaciones de alta temperatura. Por ejemplo, se deposita químicamente cobre u estaño en la superficie de un metal antes de procesarlo. Si el óxido de un metal en particular tiene poca fricción y es suficientemente delgado, la capa de óxido sirve como lubricante sólido, en particular a temperaturas altas (vea también la sección 15.3).

Vidrios. Aunque es un material sólido, el vidrio se vuelve viscoso a temperaturas elevadas, por lo que puede servir como lubricante líquido; la viscosidad es una función de la temperatura (pero no de la presión) y depende del tipo de vidrio (sección 8.4). Su baja conductividad térmica también lo hace atractivo, ya que actúa como barrera térmica entre las piezas de trabajo y los dados relativamente fríos. Por lo común la lubricación con vidrio se utiliza en aplicaciones como la extrusión en caliente y la forja en caliente.

Recubrimientos de conversión. Los lubricantes no siempre se adhieren bien a las superficies de las piezas de trabajo, en particular bajo los esfuerzos normal y cortante. La falta de adherencia tiene efectos perjudiciales en la forja, extrusión y trefilado de aceros, aceros inoxidable y aleaciones de alta temperatura. Para estas aplicaciones primero se transforman las superficies de la pieza de trabajo por medio de una reacción química con ácidos, de ahí el término *conversión* (vea también la sección 34.10).

Esta reacción deja una superficie algo rugosa y esponjosa, la cual actúa como portador para el lubricante. Después del tratamiento el ácido excedente se elimina de la superficie con bórax o cal. Después se aplica a la superficie un lubricante líquido, como jabón; éste se adhiere a la superficie y no se desprende fácilmente. Con frecuencia se usan recubrimientos de *fosfato de zinc* para la conversión de aceros al carbono y aceros de baja aleación. Los *recubrimientos de oxalato* se emplean para los aceros inoxidable y aleaciones de alta temperatura.

33.7.7 Selección de fluidos para el trabajo de metales

La selección de un fluido para el trabajo de metales en una aplicación particular y con cierto material de la pieza de trabajo implica la consideración de varios factores:

1. Proceso específico de manufactura.
2. Material de la pieza de trabajo.
3. Material de la herramienta o dado.
4. Parámetros de procesamiento.
5. Compatibilidad del fluido con los materiales de la herramienta y el dado y con la pieza de trabajo.
6. Preparación requerida para la superficie.

7. Método de aplicación del fluido.
8. Remoción del fluido y limpieza de la pieza de trabajo después del procesamiento.
9. Contaminación del fluido por otros lubricantes, como los que se utilizan para lubricar la maquinaria.
10. Almacenamiento y mantenimiento de los fluidos.
11. Tratamiento del lubricante de desecho.
12. Consideraciones biológicas y ambientales.
13. Costos implicados en todos los factores ya enunciados.

También debe tomarse en cuenta la función específica de un fluido para el trabajo de metales, ya sea sobre todo un *lubricante* o un *refrigerante*. Los fluidos basados en agua son refrigerantes muy eficaces, pero como lubricantes no son tan efectivos como los aceites. Se estima que en 80 a 90% de las operaciones de maquinado se utilizan fluidos de base agua.

Los requerimientos específicos de los fluidos para el trabajo de metales son los siguientes:

- No deben dejar residuos peligrosos que interfieran con las operaciones de producción.
- No deben oxidar o corroer la pieza de trabajo o el equipo.
- Es necesaria la inspección periódica para detectar el deterioro causado por el crecimiento de bacterias, acumulación de óxidos, astillas, restos del desgaste y la degradación y daños generales debidos a la temperatura y el tiempo. Es en particular importante la presencia de partículas de desgaste, ya que causan daño al sistema; por consiguiente, son esenciales la inspección y el filtrado.

Después de terminar las operaciones de manufactura, las superficies de la pieza de trabajo suelen tener residuos de lubricante; éstos se deben eliminar antes de continuar procesos como soldadura o pintura. Los lubricantes de base agua son más difíciles y caros de remover que los fluidos base agua. En la sección 34.16 se describen varias soluciones y técnicas de limpieza para este propósito.

Consideraciones biológicas y ambientales. Estas consideraciones son factores importantes en la selección de un fluido para el trabajo de metales. Puede haber riesgos si alguien toca o inhala algunos de dichos fluidos, como inflamación cutánea (*dermatitis*) y la exposición por mucho tiempo a carcinógenos. Asimismo, la eliminación inadecuada de los fluidos para el trabajo de metales tiene efectos perjudiciales en el ambiente. Para impedir o restringir el crecimiento de microorganismos tales como bacterias, levaduras, mohos, algas y virus, se agregan productos químicos (*biocidas*) a los fluidos para trabajar con metales.

Se han hecho muchos avances en el desarrollo de fluidos seguros para el ambiente (*verdes*) y también en la tecnología y equipo para su tratamiento, reciclado y eliminación adecuados. En Estados Unidos se han promulgado leyes y reglamentos con respecto a la manufactura, el transporte, uso y eliminación de fluidos para el trabajo de metales por parte de la Oficina de Seguridad y Salud en el Trabajo (OSHA, por sus siglas en inglés), el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud en el Trabajo (NIOSH, por sus siglas en inglés) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés).

RESUMEN

- Las superficies y sus propiedades son tan importantes como las propiedades volumétricas de los materiales. Una superficie no sólo tiene una forma, rugosidad y aspecto particulares, sino también propiedades que difieren mucho de las del grueso del material.

- Las superficies están expuestas al ambiente, por lo que quedan sujetas al ataque de los elementos. También entran en contacto con herramientas y dados (durante el procesamiento) o con otros componentes (en su vida de servicio).
- Las propiedades geométricas y materiales de las superficies afectan significativamente sus propiedades de fricción, desgaste, fatiga, corrosión y conductividad eléctrica y térmica.
- La medición y descripción de los rasgos de una superficie, inclusive sus características, son aspectos importantes de la manufactura. La medida más común de la rugosidad de la superficie es el valor de la media aritmética. Los instrumentos que por lo general se utilizan para medir la rugosidad incluyen perfilómetros, interferómetros ópticos y microscopios de fuerza atómica.
- La fricción y el desgaste se encuentran entre los factores más significativos en el procesamiento de los materiales. Ha habido muchos avances en la comprensión de estos fenómenos y en la identificación de los factores que los gobiernan.
- Otros factores importantes son la afinidad y solubilidad sólida de los dos materiales en contacto, la naturaleza de las películas superficiales, la presencia de contaminantes y parámetros del proceso como carga, velocidad y temperatura.
- Existe una amplia variedad de fluidos para aplicaciones específicas en el trabajo de metales, entre ellos aceites, emulsiones, soluciones sintéticas y lubricantes sólidos. Su selección y uso requiere la consideración cuidadosa de muchos factores con respecto a los materiales de la pieza de trabajo, del dado y del proceso de manufactura en particular.
- Los fluidos para el trabajo con metales tienen varias características de lubricación y enfriamiento. En su selección también son factores importantes los aspectos biológico y ambiental.

TÉRMINOS CLAVE

Acabado de la superficie	Desgaste	Lixiviación selectiva	Recubrimientos de conversión
Aceites	Desgaste abrasivo	Lubricación	Refrigerante
Aceites compuestos	Desgaste adhesivo	Lubricación de frontera	Rugosidad de la superficie
Aceites solubles en agua	Desgaste por fatiga	Lubricación de película delgada	Sustrato
Adhesión	Desgaste por impacto	Lubricación de película gruesa	Textura de la superficie
Aditivos	Desgaste severo	Lubricación mixta	Tribocorrosión
Aditivos de presión extrema	Emulsión	Lubricante	Tribología
Altura máxima de la rugosidad	Estructura de la superficie	Lubricantes sólidos	Valor de la media aritmética
Arado	Fluidos para el trabajo de metales	Microsoldadura	Vibraciones ultrasónicas
Asperzas	Fuerza de fricción	Ondulaciones	
Autolubricación	Funcionamiento	Partes de desgaste	
Capa	Grasas	Perfilómetro superficial	
Capa de óxido	Imperfecciones	Picadura	
Ceras	Integridad de la superficie	Prueba de compresión de anillo	
Coefficiente de fricción	Jabones	Raíz del promedio de los cuadrados	

BIBLIOGRAFÍA

- Astakhov, V. P., *Tribology of Metal Cutting*, Elsevier, 2007.
- Basu, B. y Kalin, M., *Tribology of Ceramics and Composites*, Wiley-American Ceramic Society, 2011.
- Bhushan, B., *Introduction to Tribology*, Wiley, 2002.
- Bhushan, B., *Modern Tribology Handbook*, 2 vols. CRC Press, 2000.
- Burakowski, T. y Wiershon, T., *Surface Engineering of Metals: Principles, Equipment, Technologies*, CRC Press, 1998.
- Byers, J. P., *Metalworking Fluids*, 2a. ed., CRC Press, 2006.
- Chattopadhyay, R., *Surface Wear: Analysis, Treatment, and Prevention*, ASM International, 2001.

Gohar, R., *Fundamentals of Tribology*, Imperial College Press, 2008.
 Rabinowicz, E., *Friction and Wear of Materials*, 2a. ed., Wiley, 1995.

Stachowiak, G. W., *Wear: Materials, Mechanisms and Practice*, Wiley, 2006.

PREGUNTAS DE REPASO

- 33.1** ¿Qué es tribología?
33.2 Explique qué significan (a) textura de una superficie, e (b) integridad de una superficie.
33.3 Enuncie y explique los tipos de defectos que es común encontrar en las superficies.
33.4 Defina los términos: (a) rugosidad y (b) ondulaciones.
33.5 Explique por qué los resultados de un perfilómetro no son una ilustración verdadera de la superficie real.
33.6 Describa las características de una prueba de compresión de anillo. ¿Requiere la medición de fuerzas?
33.7 Haga una lista de los tipos de desgaste que por lo general se observan en la práctica de la ingeniería.
33.8 Defina los términos desgaste, fricción y lubricante.
33.9 ¿Cómo se puede reducir el desgaste adhesivo?, ¿y el abrasivo?
33.10 Explique los mecanismos por los cuales se forma una partícula de desgaste a partir del desgaste adhesivo, y el desgaste abrasivo de dos y tres cuerpos.
33.11 Explique las funciones de un lubricante en los procesos de manufactura.
33.12 ¿Qué es una grasa? ¿Qué es una emulsión?
33.13 ¿Cuál es el rol de los aditivos en los fluidos para el trabajo de metales?
33.14 Describa los factores involucrados en la selección del lubricante.
33.15 Explique por qué el grafito y el disulfuro de molibdeno son lubricantes sólidos eficaces.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 33.16** Dé varios ejemplos que ilustren la importancia de la fricción en los procesos de manufactura descritos en las partes III y IV.
33.17 Explique el significado del hecho de que la dureza de los óxidos de metal por lo general es mucho mayor que la de los metales base en sí. Aporte algunos ejemplos.
33.18 ¿Qué factores consideraría para especificar la capa necesaria de una superficie para una parte? Explique.
33.19 Explique por qué valores idénticos de la rugosidad de una superficie no necesariamente representan el mismo tipo de superficie.
33.20 ¿Por qué son tan amplios los requerimientos para el diseño de la rugosidad de la superficie en las aplicaciones de ingeniería? Explíquelo con ejemplos específicos.
33.21 ¿Cuál es el significado del aumento de temperatura superficial debido a la fricción? Dé algunos ejemplos con base en los temas cubiertos en los capítulos anteriores.
33.22 Explique las causas de las capas en las superficies.
33.23 Dé varios ejemplos de la forma en que el desgaste de los moldes, herramientas y dados afecta una operación de manufactura.
33.24 Comente acerca de la rugosidad de una superficie de varias partes y componentes con los que usted esté familiarizado. ¿Qué tipos de partes presentan la superficie más áspera? ¿Qué tipos tienen la más fina? Explique.
33.25 (a) Dé dos ejemplos en los que sería deseable la ondulación de una superficie. (b) Proporcione dos ejemplos en los que no sería deseable.
33.26 Haga lo mismo para el problema 33.25, pero para la rugosidad de la superficie.
33.27 Describa sus observaciones con respecto a la figura 33.7.
33.28 Dé las razones por las que un espécimen originalmente circular se puede convertir en ovalado después de deformarse en una prueba de compresión de anillo.
33.29 ¿Podría aplicarse la prueba de compresión de anillo a la laminación? Explique.
33.30 Explique la razón de que la resistencia de un material al desgaste por abrasión es una función de su dureza.
33.31 Con base en su experiencia, elabore una lista de partes y componentes que tengan que reemplazarse debido al desgaste.
33.32 Haga una lista de las semejanzas y diferencias entre el desgaste adhesivo y el abrasivo.
33.33 Explique qué tipos de desgaste tienen lugar en ubicaciones particulares de un dado de estampado, según se ilustran en la figura 33.11.
33.34 Haga una lista de los requerimientos de un lubricante.
33.35 Ponga en una lista las operaciones de manufactura en las cuales es deseable una gran fricción y aquellas en las que es preferible una baja fricción.
33.36 Haga una lista de las operaciones de manufactura en las que es deseable mucho desgaste y aquellas en las cuales es preferible un desgaste menor.
33.37 Se ha observado que el coeficiente de fricción entre el carro y los rieles de un torno es de 0.35. Para reducir la fricción y humedecer las superficies se aplica queroseno (un fluido de muy baja viscosidad) en la interfase. En vez de reducir la fricción, ahora se mide a 0.38. Proporcione una explicación para estos resultados.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

33.38 Consulte el perfil que se muestra en la figura 33.3 y dé algunos valores numéricos razonables para las distancias verticales a partir de la línea central. Calcule los valores de R_a y R_q . Después proporcione otro conjunto de valores para el mismo perfil general y calcule las mismas dos cantidades. Haga comentarios sobre sus observaciones.

33.39 Obtenga varias partes distintas hechas con varios materiales, inspeccione sus superficies con un microscopio óptico en diferentes aumentos y haga una sugerencia informada acerca del proceso de manufactura o acabado que es probable se haya utilizado para producir cada una de dichas partes. Explique su razonamiento.

33.40 Una superficie con patrón de rugosidad de diente de sierra triangular tiene una altura entre un pico y un valle de $4 \mu\text{m}$. Encuentre los valores de R_a y R_q .

33.41 Consulte la figura 33.6b y mida los diámetros externo e interno (en la dirección horizontal de la fotografía) de los cuatro especímenes que se muestran. Teniendo presente que en la deformación plástica el volumen de los anillos permanece constante, estime (a) la reducción de la altura y (b) el coeficiente de fricción para cada uno de los tres especímenes comprimidos.

33.42 Con base en la figura 33.7, construya una gráfica del coeficiente de fricción *versus* el cambio del diámetro interno para una reducción de 35% constante de la altura.

33.43 Suponga que en el ejemplo 33.1 el coeficiente de fricción es de 0.16. Si todos los demás parámetros permanecen sin cambio, ¿cuál es el nuevo diámetro interno del espécimen?

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

33.44 En una lista, ponga las etapas que usted seguiría si deseara reducir la fricción en un proceso de manufactura.

33.45 Analice las diferencias tribológicas entre los elementos comunes de una máquina (como engranes, levas y rodamientos) y los procesos de trabajo de metales que usan herramientas, moldes y dados. Considere factores como carga, velocidad y temperatura.

33.46 La sección 33.2 enuncia los principales defectos de las superficies. ¿Cómo determinaría usted si cada uno de ellos es o no un factor significativo en una aplicación particular?

33.47 Describa sus reflexiones sobre las consideraciones biológicas y ambientales en el uso de fluidos para el trabajo de metales.

33.48 El desgaste puede tener efectos perjudiciales en las operaciones de manufactura. ¿Puede visualizar situaciones en que el desgaste sea benéfico? Explique y proporcione algunos ejemplos.

33.49 Muchas partes de diferentes utensilios y automóviles tienen que reemplazarse debido a su desgaste. Describa la metodología que usted seguiría para determinar los tipos de desgaste que sufrirían estos componentes.

33.50 En el segundo párrafo de la introducción de la parte VII se mencionan cinco conjuntos distintos de condiciones de la interfase, del inciso (a) al (e). Para cada uno de ellos presente varios ejemplos de los procesos de manufactura descritos en este libro.

33.51 Describa sus reflexiones sobre lo deseable de integrar instrumentos de medición de la rugosidad de la superficie en las máquinas herramienta descritas en las partes III y IV. ¿Cómo lo haría usted, haciendo una consideración especial al ambiente de la fábrica en que se usarían? Elabore algunos dibujos preliminares de dicho sistema.

Tratamientos, recubrimientos y limpieza de superficies

CAPÍTULO 34

- Aunque la selección del material y del proceso son aspectos críticos de la manufactura, es frecuente que las propiedades de la superficie de un componente o parte determinen también su rendimiento.
- En este capítulo se describen varias operaciones de modificación de superficies que se llevan a cabo en las partes por razones técnicas y estéticas.
- El capítulo presenta los procesos comunes de tratamiento, limpieza y recubrimiento de superficies, e incluye el análisis de los tratamientos superficiales mecánicos, tales como el granallado, granallado láser y bruñido con rodillos para ejercer esfuerzos residuales compresivos sobre las superficies metálicas.
- Después se estudian las operaciones de recubrimiento, entre ellas el revestimiento, rociado térmico, deposición de vapor física y química, implantación de iones y electrodeposición; también se analizan los beneficios de los recubrimientos de diamante y de carbono similar al diamante.

34.1 Introducción

Después de que se manufactura una parte, algunas de sus superficies tienen que procesarse aún más con el fin de asegurar que tengan ciertas propiedades y características. Los **tratamientos de la superficie** son necesarios para:

- *Mejorar la resistencia al desgaste, a la erosión y a la formación de muescas*, como sucede en las superficies de deslizamiento de las máquinas herramienta (figuras 23.2 y 35.1), ejes, cilindros, levas y engranes.
- *Reducir la fricción*, como en las superficies deslizantes de herramientas, dados, rodamientos y correderas de las máquinas.
- *Disminuir la adhesión*, como en los contactos eléctricos.
- *Mejorar la resistencia a la corrosión y oxidación* en placas metálicas de carrocerías automotrices, componentes de turbinas de gas, empaque de comida y equipos médicos.
- *Mejoramiento de la resistencia a la fatiga* en rodamientos y ejes con biseles.
- *Reconstrucción de superficies* de herramientas, dados, moldes y componentes de máquinas desgastados.
- *Modificar la textura de la superficie*, aspecto, exactitud dimensional y características de fricción.
- *Dar aspectos decorativos*, como textura o color y textura.

Son numerosas las técnicas que se emplean para dar estas características a los diferentes tipos de materiales metálicos, no metálicos y cerámicos, e incluyen mecanismos que implican (a) deformación plástica de la superficie de la pieza de trabajo; (b) reacciones químicas; (c) medios térmicos; (d) deposición; (e) implantación y (f) recubrimientos

34.1	Introducción	985
34.2	Tratamientos mecánicos de la superficie	986
34.3	Deposición y chapeado mecánicos	987
34.4	Endurecimiento superficial y revestimiento duro	988
34.5	Rociado térmico	988
34.6	Deposición de vapor	989
34.7	Implantación iónica y recubrimiento por difusión	993
34.8	Tratamientos con láser	993
34.9	Electrodeposición, deposición no electrolítica y electroformado	994
34.10	Recubrimientos de conversión	998
34.11	Inmersión en caliente	998
34.12	Porcelanizado; recubrimientos cerámicos y orgánicos	999
34.13	Recubrimientos de diamante y de carbono similar al diamante	1000
34.14	Texturizado de la superficie	1001
34.15	Pintura	1001
34.16	Limpieza de las superficies	1002

EJEMPLOS:

34.1	Aplicaciones de la ingeniería de superficies con láser	994
34.2	Recubrimientos cerámicos para aplicaciones de alta temperatura	1000

orgánicos y pinturas. Algunas de estas técnicas también se usan en la manufactura de partes semiconductoras (consulte el capítulo 28, disponible en inglés en la página web del libro).

El capítulo termina con el análisis de los métodos que se usan para limpiar las superficies manufacturadas antes de ensamblar los componentes en el producto terminado y que esté listo para el servicio. También se exponen las consideraciones ambientales sobre los fluidos usados y los materiales de desecho de varios procesos del tratamiento de superficies.

34.2 Tratamientos mecánicos de la superficie

Se utilizan varios métodos para mejorar mecánicamente las propiedades de las superficies de los componentes manufacturados; los más comunes son los siguientes:

Granallado. En este proceso, la superficie de la pieza de trabajo es impactada repetidamente con partículas (llamadas *granallas* o *perdigones*) de acero fundido, vidrio o cerámico, que producen abolladuras que se traslapan. Al usar granallas cuyo diámetro va de 0.125 a 5 mm (0.005 a 0.2 pulg), esta acción causa deformación plástica de la superficie a profundidades de hasta 1.25 mm (0.05 pulg). Debido a que la deformación plástica no es uniforme en el espesor de la parte (vea también la figura 2.14c), el granallado causa esfuerzos residuales compresivos en la superficie, lo que mejora la vida de fatiga del componente. A menos que los parámetros de este proceso se controlen adecuadamente, la deformación es tan severa que llega a causar daño en la superficie. El grado de deformación se reduce por medio del *granallado por gravedad*, que involucra tamaños más grandes de disparo pero con menos impactos en la superficie de la pieza de trabajo.

El granallado se usa mucho en ejes, engranes, muelles, equipo de perforación de pozos petroleros y álabes de compresores de turbina. Sin embargo, observe que si estas partes se sujetan posteriormente a temperaturas elevadas (como los álabes de las turbinas de gas), los esfuerzos residuales comenzarán a relajarse (*relajación térmica*) y sus efectos benéficos disminuirán.

Impactado con láser. En este proceso, también llamado *martilleo por impacto láser* (desarrollado por primera vez a mediados de la década de 1960 pero no comercializado sino hasta mucho después), la superficie de la pieza de trabajo se sujeta a *pulsos* (choques de láser planares) de láseres de alta potencia. Este proceso de impactar produce capas de esfuerzos residuales que en general tienen 1 mm (0.04 pulg) de profundidad, con menos de 1% de trabajo frío en la superficie.

El martilleo por impacto láser se ha aplicado con éxito y confiabilidad a los álabes de ventiladores de motores a reacción y en materiales como el titanio, aleaciones de níquel y aceros para mejorar la resistencia a la fatiga y dar cierta resistencia ante la corrosión. Las intensidades del láser son del orden de 100 a 300 J/cm² y tienen una duración de pulso de 10 a 50 ns. La limitación fundamental del martilleo por impacto láser para aplicaciones industriales rentables es el alto costo de los equipos de alta potencia (más de 1 kW) que deben operar con niveles de energía de 100 J/pulso.

Impacto con chorro de agua. En este proceso, un chorro de agua a presión de hasta 400 MPa (60 000 psi) golpea la superficie de la pieza de trabajo, lo que induce esfuerzos residuales de compresión y con endurecimiento de la superficie y subsuperficial al mismo nivel que en el granallado mecánico. El proceso de impactar con chorro de agua se ha usado con éxito en acero y aleaciones aluminio. Es importante el control de las variables del proceso (como presión del chorro, velocidad del agua, diseño de la boquilla y su distancia a la superficie) con objeto de evitar la rugosidad excesiva o el daño de la superficie.

Impacto ultrasónico. Este proceso usa una herramienta de mano que vibra por medio de un transductor piezoeléctrico a una frecuencia de 22 kHz. Se utilizan varios cabezales para diferentes aplicaciones.

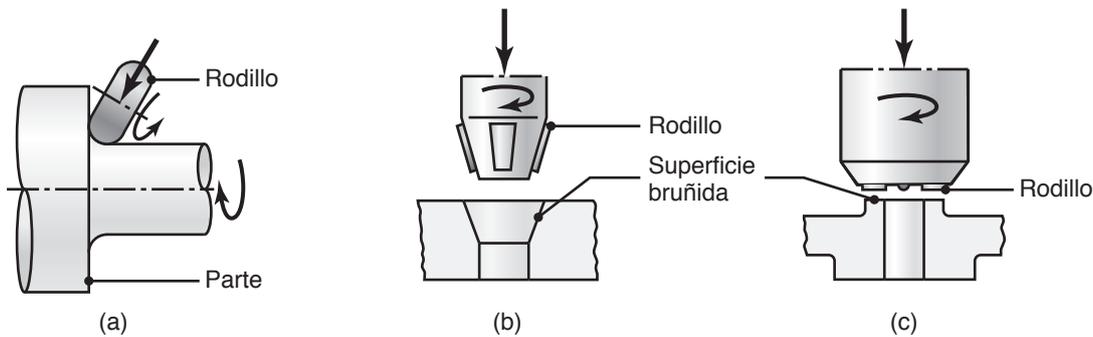


FIGURA 34.1 Herramientas para bruñido y el bruñido con rodillos de (a) el bisel de un eje con escalón para inducir esfuerzos residuales de compresión en la superficie y mejorar la vida de fatiga; (b) una superficie cónica y (c) una superficie plana.

Bruñido con rodillos. También llamado *laminado* o *rolado superficial*, en este tratamiento la superficie del componente se trabaja en frío con la acción de una o varias herramientas rodantes duras y muy pulidas; el proceso se emplea en varias superficies planas, cilíndricas o cónicas (figura 34.1). El bruñido con rodillos mejora el acabado de la superficie al eliminar rayones, marcas de herramientas y hoyuelos e induce esfuerzos residuales compresivos en la superficie que resultan benéficos. En consecuencia, mejora la resistencia a la corrosión ya que no pueden acumularse productos y residuos corrosivos. En una variante de este proceso, llamado *bruñido de baja plasticidad*, la pieza rodante recorre una sola vez la superficie, lo que induce una deformación plástica mínima.

Las superficies cilíndricas internas de las perforaciones también pueden bruñirse con un proceso llamado *boleado* o *bruñido con bola*. En esta operación se empuja una pequeña bola (un poco más grande que el diámetro del agujero) a lo largo de la perforación.

Es común que el bruñido con rodillos se utilice en componentes de sistemas hidráulicos, sellos, válvulas, ejes y biseles de éstos, y mejora sus propiedades mecánicas así como el acabado de la superficie. Se emplea solo o en combinación con otros procesos de acabado (como el esmerilado, asentado y lapeado), en cuyo caso la operación de acabado se realiza después de bruñir la parte con el fin de producir una superficie suave. El equipo se puede montar en varias herramientas de control numérico computarizado (CNC) con objeto de mejorar la productividad y consistencia del rendimiento. Se pueden bruñir todos los tipos de metales blandos o duros.

Endurecimiento explosivo. En este proceso las superficies se sujetan a altas presiones mediante la colocación y detonación de una capa de explosivo directamente sobre la superficie de la pieza de trabajo. Las presiones de contacto desarrolladas llegan a ser de hasta 35 GPa (5×10^6 psi) con duración de 2 a 3 μ s. Se puede lograr un aumento significativo en la dureza de la superficie, con muy poco cambio (menos de 5%) de la forma del componente. Las superficies de los rieles de ferrocarril, por ejemplo, son endurecidas con explosivos.

34.3 Deposición y chapeado mecánicos

Deposición mecánica. En la *deposición mecánica* (también llamada *revestimiento mecánico*, *revestimiento por impacto* o *revestimiento por martilleo*), se compactan finas partículas de metal sobre las superficies de la pieza de trabajo por medio de cuentas de vidrio, cerámico o porcelana que son impulsadas por medios rotatorios (como el volteado). Este proceso, que es básicamente de soldadura en frío de partículas sobre una superficie, se utiliza por lo general para partes de acero endurecido, como las de automóviles, con espesores del recubrimiento a menudo menores de 25 μ m (0.001 pulg).

Chapeado mecánico. En este proceso, conocido también como *adhesión de chapa*, se adhiere a los metales una capa de metal resistente a la corrosión mediante la aplicación de presión con cilindros u otros medios (vea la figura 31.1). Un ejemplo común es el chapeado de aluminio (*Alclad*), en el cual se coloca una capa de aluminio puro o una aleación resistente a la corrosión sobre un cuerpo de aleación de aluminio (núcleo). La chapa es el ánodo con respecto al núcleo y por lo general tiene un espesor menor que 10% del total.

Ejemplos de chapeado mecánico son la chapa de aluminio 2024 con aluminio 1230 y las chapas de aluminio 3003, 6061 y 7178 con aluminio 7072; otras aplicaciones incluyen chapas de aceros con aleaciones de acero inoxidable o de níquel. El material de la chapa también se puede aplicar por medio de dados (como en la chapa de alambre de acero con cobre) o explosivos. En aplicaciones especiales también se utiliza el chapeado con capas múltiples.

El **chapeado con láser** implica la fusión de un alambre o material en polvo sobre un sustrato. Se ha aplicado con éxito a metales y cerámicos, en especial para mejorar el desgaste de los componentes ante la fricción y el desgaste.

34.4 Endurecimiento superficial y revestimiento duro

Las superficies también se pueden endurecer por medios térmicos para mejorar sus propiedades de fricción y desgaste, así como su resistencia a la indentación, erosión, abrasión y corrosión. Los métodos más comunes son los siguientes:

Endurecimiento superficial. En la sección 4.10 y la tabla 4.1 se describen y resumen los métodos tradicionales de endurecimiento superficial (*carburización, carbonitrurización, nitrurización, cianuración, temple a la flama y temple por inducción*). Además de las fuentes de calor comunes (como gas o electricidad), también puede usarse un haz de electrones como fuente calorífica, tanto para metales como para cerámicos. El endurecimiento superficial, así como los otros procesos de tratamiento de superficies descritos en este capítulo, induce esfuerzos residuales sobre éstas como, por ejemplo, con la formación de martensita, lo cual causa esfuerzos residuales de compresión.

Revestimiento duro. En este proceso se deposita una capa relativamente gruesa, borde o punto, de metal duro resistente al desgaste sobre la superficie de la pieza de trabajo con técnicas de soldadura por fusión (capítulo 30). Para reparar partes desgastadas se pueden depositar varias capas, proceso conocido como *soldadura sobrepuesta*. El revestimiento duro mejora la resistencia de los materiales contra el desgaste, por lo que se usa en la manufactura de herramientas, dados y diferentes componentes industriales.

Endurecimiento con chispa. Se pueden depositar recubrimientos duros de tungsteno, cromo o molibdeno por medio de un arco eléctrico, en un proceso llamado *endurecimiento con chispa, endurecimiento con chispa eléctrica o deposición con chispa eléctrica*. Es común que la capa depositada tenga un espesor de 250 μm (0.01 pulg). Las aleaciones con revestimiento duro se usan como electrodos, cilindros (barras) de rodamiento, conductores o polvos en el endurecimiento con chispa. Las aplicaciones típicas son para sellos de válvulas, herramientas para perforar pozos petroleros y dados para el trabajo de metales en caliente.

34.5 Rociado térmico

El *rociado térmico* es una serie de procesos con los que se aplican recubrimientos de diferentes metales, aleaciones, carburos, cerámicos y polímeros a superficies metálicas por medio de una pistola rociadora y una corriente calentada con flama de oxicombustible, arco eléctrico o arco de plasma. Las primeras aplicaciones del rociado térmico, en la década de 1910, implicaban metales, de ahí el término **metalización** que también se utiliza. Primero se limpian el aceite y la suciedad de las superficies que se van a rociar y luego se incrementa su rugosidad, con granallado por ejemplo, para mejorar la resistencia de la adhesión (vea la sección 26.8). El material del recubrimiento puede estar, al principio, en forma de alambre, barra o polvo, y cuando se realiza el rociado térmico mediante la

fundición del alambre o de la barra, las gotitas de metal —o las partículas de polvo en su caso— impactan en la pieza de trabajo, donde se solidifican y adhieren a la superficie.

Por lo común las velocidades de las partículas van de un mínimo de 150 hasta 1000 m/s, pero para aplicaciones especiales son mayores. Las temperaturas están en el rango de 3000 a 8000 °C (5500 a 14 000 °F). El recubrimiento rociado es duro y resistente al desgaste, con una estructura de capas del material depositado; sin embargo, el recubrimiento puede tener una porosidad grande, hasta de 20%, debido a que atrape aire y partículas de óxido. La resistencia de la adhesión depende del proceso y de las técnicas particulares que se utilicen, pero sobre todo es de naturaleza mecánica (de ahí la importancia de dar rugosidad a la superficie antes de rociarla) aunque también puede ser metalúrgica. La resistencia de la adhesión va de 7 a 80 MPa (de 1 a 12 ksi), lo que depende del proceso particular que se emplee.

Las aplicaciones comunes del rociado térmico incluyen componentes de motores de aviación (como los empleados para reconstruir las partes desgastadas), estructuras, tanques de almacenamiento, carros cisterna, toberas de motores de cohete y componentes que requieran resistencia al desgaste y a la corrosión. En los automóviles el rociado térmico se aplica con frecuencia a los cigüeñales, válvulas, inyectores de combustible, anillos de pistones y bloques del motor. El proceso también se usa en las industrias del gas y petroquímica, para la reparación de partes desgastadas y para restaurar la exactitud dimensional de partes que no se hayan maquinado o formado adecuadamente.

La fuente de energía en los procesos de rociado térmico es de dos tipos: combustión química y eléctrica.

1. Rociado por combustión

- **Rociado térmico con alambre** (figura 34.2a): la flama de oxicomcombustible funde el alambre y lo deposita en la superficie. La adhesión es de resistencia media y el proceso es relativamente barato.
- **Rociado térmico con polvo metálico** (figura 34.2b): este proceso es similar al rociado térmico con alambre, pero usa un polvo metálico en lugar de un alambre.
- **Pistola detonadora**: se provocan explosiones controladas y repetidas por medio de una mezcla de gas oxicomcombustible. La pistola detonadora tiene un rendimiento semejante al del plasma.
- **Rociado de gas oxicomcombustible de alta velocidad** (HVOF, por sus siglas en inglés): este proceso tiene características parecidas a las de pistola detonadora, pero es menos caro.

2. Rociado eléctrico

- **Arco de alambres gemelos**: se forma un arco entre dos electrodos consumibles de alambre; la adhesión resultante tiene buena resistencia y el proceso es el menos caro.
- **Plasma**: un plasma convencional, de alta energía o de vacío (figura 34.2c) produce temperaturas del orden de 8300 °C (15 000 °F) y da como resultado una buena resistencia de la adhesión con muy poco contenido de óxido. Tanto el **rociado con plasma de baja presión** (LPPS, por sus siglas en inglés) como el **rociado con plasma de vacío** producen recubrimientos con alta resistencia en su adhesión y muy bajos niveles de porosidad y óxidos superficiales.

Rociado en frío. Las partículas que se van a rociar están a baja temperatura y no fundidas; por consiguiente, la oxidación es mínima. El chorro de rociado es angosto y muy concentrado; tiene velocidades de impacto muy altas, lo que mejora la resistencia de la adhesión de las partículas sobre la superficie.

34.6 Deposición de vapor

La *deposición de vapor* es un proceso en el cual el sustrato (superficie de la pieza de trabajo) se somete a reacciones químicas por medio de gases que contienen compues-

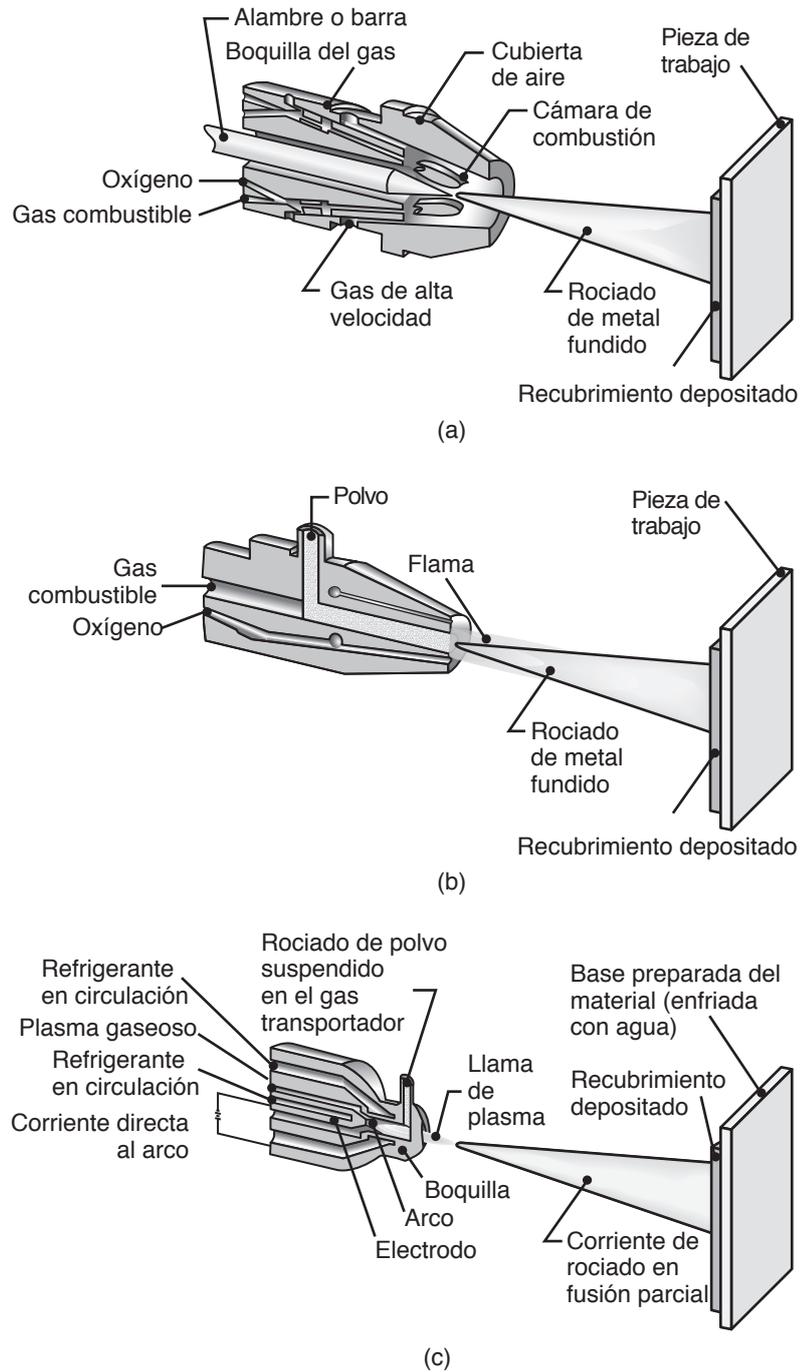


FIGURA 34.2 Ilustraciones esquemáticas de las operaciones de rociado térmico: (a) rociado térmico con alambre; (b) rociado térmico con polvo metálico y (c) rociado con plasma.

tos químicos del material que se va a depositar. El espesor del recubrimiento suele ser de algunas micras, lo que es mucho menos que el espesor que resulta con las técnicas descritas en las secciones 34.2 y 34.3. El sustrato puede ser de metal, plástico, vidrio o papel, y el material depositado consiste en metales, aleaciones, carburos, nitruros, boruros, cerámicos u óxidos. Es importante el control de la composición, del espesor y de la porosidad del recubrimiento. Las aplicaciones comunes de la deposición de vapor son el recubrimiento de herramientas de corte, brocas, escariadores, fresas, punzones, dados y superficies de desgaste.

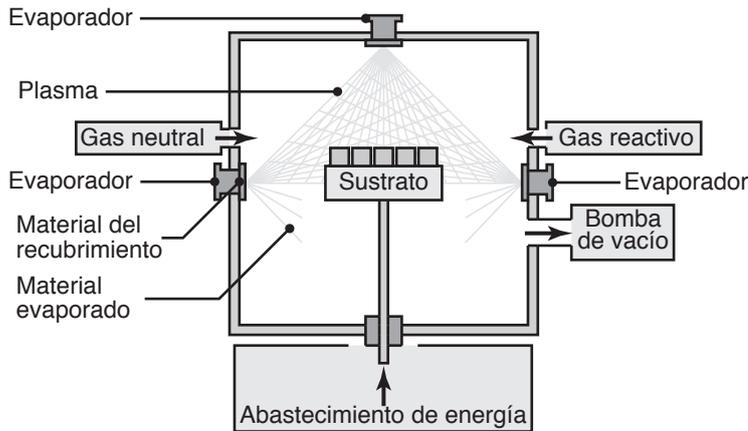


FIGURA 34.3 Ilustración esquemática del proceso de deposición física de vapor; observe que hay tres evaporadores de arco y las partes que se van a recubrir están colocadas en una charola dentro de la cámara.

Hay dos procesos principales de deposición de vapor: física y química.

34.6.1 Deposición física de vapor

Los tres tipos básicos de *deposición física de vapor* (PVD, por sus siglas en inglés) son: (a) deposición al vacío o evaporación por arco; (b) pulverización catódica y (c) deposición iónica. Estos procesos se efectúan al alto vacío y a temperaturas en el rango de 200 a 500 °C (400 a 900 °F). En la PVD, las partículas que se van a depositar se llevan físicamente a la pieza de trabajo, en vez de por reacciones químicas como en la deposición química de vapor.

Deposición al vacío. En la deposición al vacío o evaporación por arco, el metal es evaporado a alta temperatura en el vacío y se deposita en el sustrato, el cual por lo general se encuentra a temperatura ambiente o un poco mayor para tener una mejor adhesión. Pueden depositarse recubrimientos de espesor uniforme, incluso de formas complejas. En la **deposición de arco** (PV/ARC), el material del recubrimiento (cátodo) se evapora por medio de varios arcos evaporadores (figura 34.3), empleando arcos eléctricos altamente localizados. Los arcos producen un plasma muy reactivo que consiste en vapor ionizado del material del recubrimiento; el vapor se condensa en el sustrato (ánodo) y lo recubre. Las aplicaciones de este proceso son tanto funcionales (recubrimientos resistentes a la oxidación para aplicaciones de alta temperatura, electrónicas y ópticas) como decorativas (herramientas, utensilios y joyería). La **deposición por láser de pulsos** y **por haz de electrones** son procesos más recientes y relacionados, en los que haces de energía calientan el objetivo hasta hacerlo vapor.

Pulverización catódica. En la *pulverización catódica*, un campo eléctrico ioniza un gas inerte (por lo general argón); después, los iones positivos bombardean el material del recubrimiento (cátodo) y causan la pulverización catódica (expulsión) de sus átomos. Los átomos se condensan en la pieza de trabajo, que se calienta para mejorar la adhesión (figura 34.4). En la **pulverización catódica reactiva**, el gas inerte es reemplazado por un gas reactivo (como el oxígeno), en cuyo caso los átomos se oxidan y los óxidos se depositan. Los carburos y nitruros también se depositan por medio de pulverización catódica reactiva.

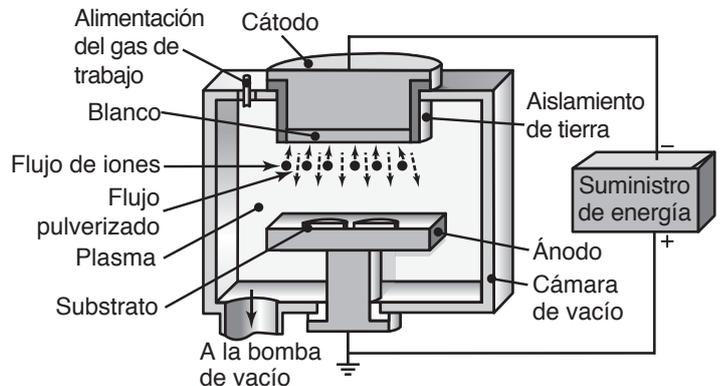


FIGURA 34.4 Ilustración esquemática del proceso de pulverización catódica.

En forma alternativa, pueden depositarse recubrimientos de polímero muy delgados sobre sustratos de metal y polímero, con un gas reactivo, lo que ocasiona la polimerización del plasma. La **pulverización catódica por radio frecuencia (RF)** se usa para materiales no conductores, como aislantes eléctricos y dispositivos semiconductores.

Deposición iónica. La expresión *deposición iónica* es un término general que describe varios procesos combinados de pulverización y evaporación al vacío. Un campo eléctrico causa una descarga luminiscente, lo que genera un plasma (figura 34.5); los átomos vaporizados se ionizan sólo parcialmente. La **deposición mejorada (asistida) con haz de iones** es capaz de producir películas delgadas, como recubrimientos para aplicaciones de semiconductores, tribológicas y ópticas. El total de las partes se recubre en grandes cámaras mediante el uso de suministros de energía con corrientes elevadas de 15 kW y voltajes de CD de 100 000. La **deposición por haz de iones dual** es una técnica híbrida de recubrimiento que combina deposición física de vapor con el bombardeo simultáneo de haces de iones, lo que da como resultado una buena adhesión sobre metales, cerámicos y polímeros. Los rodamientos de cerámicos y los instrumentos dentales son ejemplos de sus aplicaciones.

34.6.2 Deposición química de vapor

La *deposición química de vapor* (CVD, por sus siglas en inglés) es un proceso *termoquímico* (figura 34.6). En una aplicación común, como el recubrimiento de herramientas de corte con nitruro de titanio (TiN; sección 22.5), las herramientas se colocan en una charola de grafito y se calientan a una temperatura de 950 a 1050 °C (1740 a 1920 °F), a presión atmosférica y en una atmósfera inerte. Después se introducen en la cámara tetracloruro de titanio (gas), hidrógeno y nitrógeno. Las reacciones químicas forman nitruro de titanio en las superficies de las herramientas, con la producción de cloruro de hidrógeno que se expulsa de la cámara de reacción. Sin embargo, debido a su toxicidad, esta emisión de gas debe limpiarse con cuidado empleando un depurador antes de liberarlo a la atmósfera. Para el recubrimiento de carburo de titanio se sustituye el metano por los otros gases.

Los recubrimientos con CVD suelen ser más gruesos que los que se obtienen por PVD. Un ciclo normal es largo y consiste en (a) tres horas de calentamiento; (b) cuatro horas de recubrimiento y (c) de seis a ocho horas de enfriamiento a temperatura ambiente. El espesor del recubrimiento depende de las tasas de flujo de los gases que se usen, del tiempo y de la temperatura.

El proceso de deposición química de vapor es muy versátil. Casi cualquier material se puede recubrir y puede servir como sustrato, aunque la resistencia de la adhesión variará. Este proceso también se utiliza para producir recubrimientos de diamante sin aglutinan-

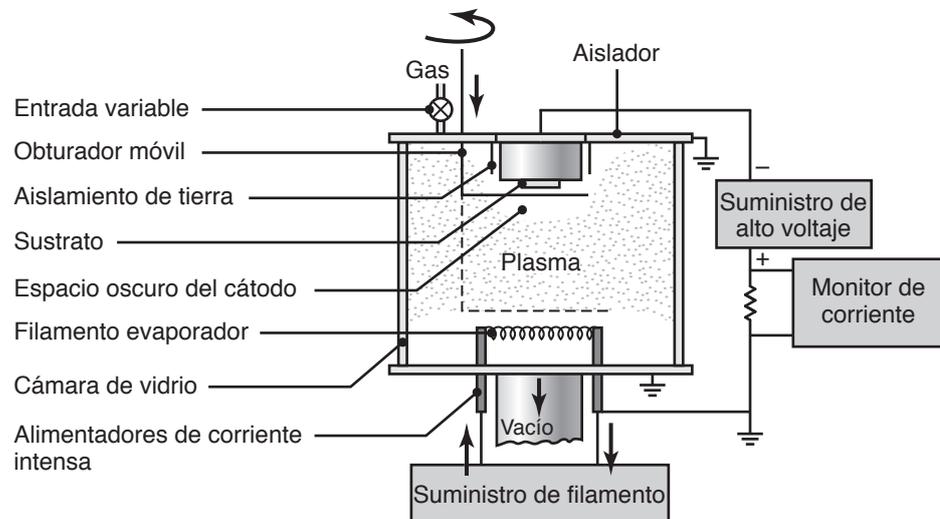


FIGURA 34.5 Ilustración esquemática de un aparato de deposición iónica.

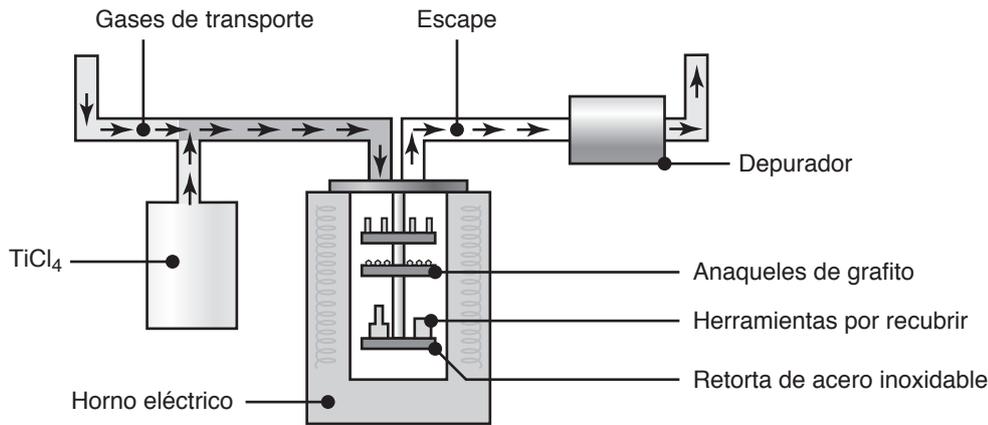


FIGURA 34.6 Ilustración esquemática del proceso de deposición química de vapor; observe que las partes y herramientas por recubrir se colocan en charolas en el interior de la cámara.

tes, a diferencia de las películas de diamante policristalino que emplean de 1 a 10% de materiales aglutinantes. La técnica de **CVD de temperatura media** (MTCVD) da como resultado mayor resistencia a la propagación de grietas que la obtenida con deposición física de vapor.

34.7 Implantación iónica y recubrimiento por difusión

En la *implantación de iones* (átomos cargados), éstos se introducen en la superficie de la pieza de trabajo. Los iones se aceleran en un vacío a un grado tal que penetran en el sustrato a una profundidad de algunas micras. La implantación de iones (no confundir con la deposición iónica, sección 34.6.1) modifica las propiedades de la superficie porque incrementa la dureza de ésta y mejora su resistencia a la fricción, al desgaste y a la corrosión. El proceso se puede controlar con exactitud y la superficie se enmascara para impedir la implantación de iones en lugares no deseados.

La implantación de iones es particularmente eficaz en materiales como el aluminio, titanio, aceros inoxidable, aceros para herramientas y dados, carburos y recubrimientos de cromo. El proceso normalmente se emplea en herramientas de corte y formado, en dados, moldes y prótesis metálicas como las de cadera y rodillas artificiales. Cuando se emplea en aplicaciones específicas como semiconductores (consulte la sección 28.3, en inglés en el sitio web del libro), la implantación de iones se llama **dopaje**, lo cual quiere decir que se hacen aleaciones con pequeñas cantidades de varios elementos.

Recubrimiento por difusión. Éste es un proceso en el que el elemento de aleación se difunde en la superficie del sustrato (acero, por lo general), lo que altera las propiedades de ésta. Los elementos de aleación se suministran en estado sólido, líquido o gaseoso. El proceso ha adoptado diferentes nombres, lo que depende del elemento difundido, como se muestra en la tabla 4.1, que presenta una lista de varios procesos de difusión como *carburización*, *nitrurización* y *borización*.

34.8 Tratamientos con láser

Como se describe en varios capítulos de este libro, los láseres tienen un uso cada vez más amplio en los procesos de manufactura (es decir, en el maquinado, formado, uniones, prototipos rápidos y metrología) y en la ingeniería de superficies (martillado, aleaciones, tratamientos de superficie y texturizado). Actualmente se dispone de láseres poderosos, eficientes, confiables y baratos para toda una variedad de tratamientos de superficie rentables, como se ilustra en la figura 34.7.



FIGURA 34.7 Esquema de los procesos de ingeniería de superficies con láser. Fuente: Basado en N. B. Dahotre.

EJEMPLO 34.1 Aplicaciones de la ingeniería de superficies con láser

En este ejemplo se dan varias aplicaciones de los láseres en la práctica de la ingeniería. Los láseres de uso más común son los de Nd:YAG y CO₂; los láseres excímer por lo general se usan para dar textura a las superficies (vea también la tabla 27.2).

1. Endurecimiento localizado de superficies

- Hierros fundidos: revestimiento de los cilindros de motores diesel, ensambles de la dirección de automóviles y árboles de levas.
- Aceros al carbono: engranes y partes electromecánicas.

2. Aleaciones de las superficies

- Aceros aleados: componentes de rodamientos.
- Aceros inoxidables: válvulas de motores diesel e insertos de asientos.

- Aceros de herramientas y dados: moldes para el formado y fundición de dados.

3. Chapeado

- Aceros aleados: válvulas automotrices y válvulas de asientos.
- Superaleaciones: álabes de turbinas.

4. Recubrimientos de cerámica

- Aleaciones de aluminio-silicio: perforaciones en motores de automóvil.

5. Texturizado de superficies

- Metales, plásticos, cerámicos y madera: todo tipo de productos.

34.9 Electrodeposición, deposición no electrolítica y electroformado

La *deposición* da resistencia contra el desgaste y la corrosión, gran conductividad eléctrica, mejor aspecto y reflexión.

Electrodeposición. En la *electrodeposición*, la pieza de trabajo (cátodo) se reviste con un metal diferente (ánodo), el cual se transfiere por medio de una solución electrolítica de base de agua (figura 34.8). Aunque el proceso de deposición implica varias reacciones, consiste básicamente en la secuencia siguiente:

1. Se descargan iones metálicos del ánodo por medio de la energía potencial de la fuente externa de electricidad, o se conducen en forma de sales metálicas.

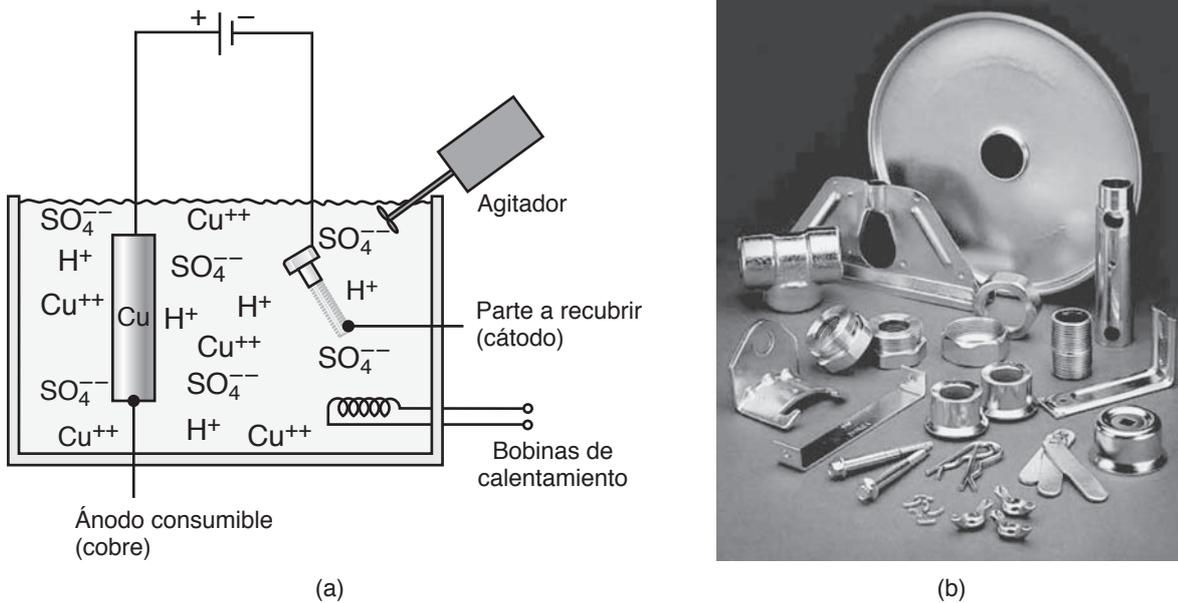


FIGURA 34.8 (a) Ilustración esquemática del proceso de electrodeposición. (b) Ejemplos de partes con electrodeposición. *Fuente:* Cortesía de BFG Manufacturing Service.

2. Los iones metálicos se disuelven en la solución.
3. Los iones metálicos se depositan en el cátodo.

El volumen del metal depositado se calcula con la ecuación

$$\text{Volumen} = cIt, \quad (34.1)$$

donde I es la corriente, en amperes, t es el tiempo y c es una constante que depende de la placa metálica, el electrolito y la eficiencia del sistema; es común que esté en el rango de 0.03 a 0.1 mm³/amp-s. Observe que para el mismo volumen de material depositado, su espesor es inversamente proporcional al área de la superficie. La tasa de deposición comúnmente es del orden de 75 μm/h, por lo que la electrodeposición es un proceso lento. Lo normal es que las capas delgadas depositadas sean de 1 μm (40 μpulg); para capas gruesas la deposición llega a ser hasta de 500 μm.

Las *soluciones de deposición* son ácidos fuertes o soluciones de cianuro. Como el metal se deposita desde la solución, tiene que reponerse periódicamente. Esto se logra con dos métodos principales: (a) se agregan ocasionalmente sales metálicas a la solución o (b) en la cuba de electrodeposición se utiliza un *ánodo consumible* del metal que se va a depositar, el cual se disuelve a la misma tasa que se deposita el metal.

Hay tres métodos básicos de electrodeposición:

1. **Deposición en anaquel:** las partes que se van a revestir se colocan en anaqueles, los cuales se pasan luego a través de una serie de tanques de procesamiento.
2. **Deposición de barril:** las partes pequeñas se colocan en un barril permeable, hecho sobre todo de malla de alambre, el cual se coloca después dentro del tanque o tanques de procesamiento. Lo normal es que esta operación se lleve a cabo con partes pequeñas como pernos, tuercas, engranes y coples. El fluido electrolítico penetra libremente a través del barril y provee el metal para el revestimiento, a la vez que el contacto eléctrico se proporciona a través del barril y por contacto con las otras partes.

3. Procesamiento con cepillo: el fluido electrolítico se bombea a través de un cepillo manual con cerdas de metal. La pieza de trabajo puede ser muy grande y el proceso es apropiado para la reparación o revestimiento en campo, también se usa para aplicar revestimientos en grandes equipos sin desarmarlos.

La electrodeposición simple se ejecuta en un baño o cuba de proceso único, pero es más común que se involucre una secuencia de operaciones en una línea de deposición. El equipo y los procesos siguientes son parte de una operación de electrodeposición:

- Se usan limpieza química y tanques de eliminación de grasas para remover contaminantes de la superficie y mejorar la adhesión superficial del recubrimiento depositado.
- Las piezas de trabajo se exponen a un baño de ácido fuerte (solución decapante) para eliminar o reducir el espesor del recubrimiento de óxido en la pieza de trabajo.
- Se aplica un recubrimiento de base. Éste puede ser el mismo metal o alguno distinto del de la superficie final; por ejemplo, si el recubrimiento metálico deseado no se adherirá bien al sustrato, se aplica un revestimiento intermedio. Asimismo, si se requieren películas gruesas se emplea un tanque de deposición para formar rápidamente una película, y después se usa un tanque con aditivos en la solución electrolítica para abrillantar y dar el acabado final a la superficie.
- En un tanque aparte se realiza la electrodeposición final.
- En toda la secuencia se utilizan tanques de lavado.

Los tanques de lavado son esenciales por varias razones. Parte de la electrodeposición se efectúa con sales de cianuro, que proporciona los iones metálicos requeridos. Si cualquier residuo ácido (como el de un tanque de decapado) llega al tanque de solución de cianuro, se producirá gas venenoso de cianuro de hidrógeno. Éste es un riesgo importante de seguridad, por lo que en las instalaciones de deposición son esenciales los controles ambientales. Asimismo, los residuos de la solución para revestir contendrán algunos iones metálicos y a veces se desea recuperarlos, por lo que se captan en un tanque de lavado.

La tasa de deposición del recubrimiento depende de la densidad de corriente local, que no necesariamente es uniforme en una parte. Las piezas de trabajo con formas complejas requieren una geometría modificada debido al espesor variable del recubrimiento, como se aprecia en la figura 34.9.

Los metales comunes de la deposición son el cromo, níquel (para proteger contra la corrosión), cadmio, cobre (resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica) y estaño y zinc (para proteger contra la corrosión, en especial a placas de acero). La **deposición de cromo** se efectúa recubriendo primero el metal con cobre, después con níquel y por último con cromo. La **deposición fuerte con cromo** se hace directamente sobre el metal base y da como resultado una superficie con dureza de más de 70 HRC (vea la figura 2.14) y un espesor de alrededor de 0.05 mm (0.002 pulg) o más. Este método se utiliza para

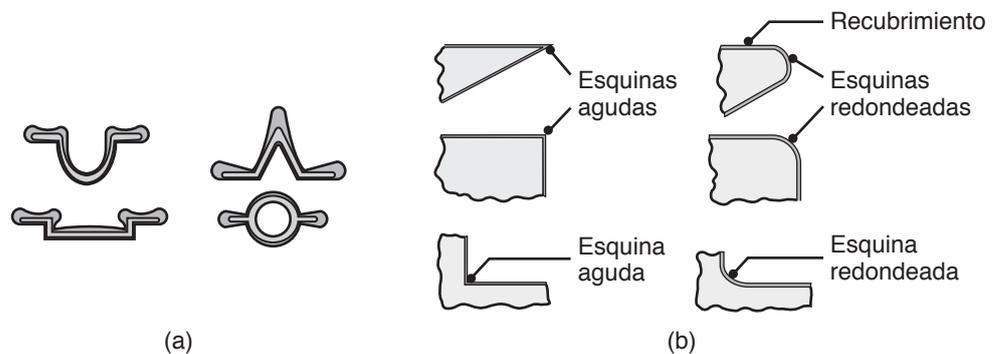


FIGURA 34.9 (a) Ilustración esquemática de recubrimientos no uniformes (exagerados) en partes mediante electrodeposición. (b) Lineamientos de diseño para la electrodeposición; observe que deben evitarse las esquinas agudas, externas e internas, para lograr un espesor uniforme de la deposición.

mejorar la resistencia al desgaste y a la corrosión en herramientas, vástagos de válvulas, ejes hidráulicos y revestimientos de los cilindros de motores de avión.

Algunos ejemplos de la electrodeposición incluyen el recubrimiento con cobre de alambres de aluminio y tableros fenólicos para circuitos impresos, el revestimiento con cromo de herramientas, terminales eléctricas de cobre recubiertas de estaño (por facilidad de soldadura), láminas metálicas galvanizadas (vea también la sección 34.11) y componentes recubiertos como dados para el trabajo de metales que requieren resistencia al desgaste y a la fricción (soldadura metalúrgica en frío de pequeñas piezas a partir de la superficie de la pieza de trabajo). Metales como oro, plata y platino son materiales importantes de electrodeposición en las industrias electrónica y de joyería, para contactos eléctricos y para fines decorativos, respectivamente.

Plásticos como el ABS, polipropileno, polisulfonas, policarbonatos, poliésteres y nylon también se pueden recubrir con electrodeposición. Debido a que no son conductores eléctricos, los plásticos deben tener una deposición previa, con un proceso como el de níquelado no electrolítico. Las partes que se van a recubrir pueden ser sencillas o complejas y el tamaño no es una limitante.

Deposición no electrolítica. Este proceso se lleva a cabo por medio de una reacción química y sin el uso de una fuente externa de electricidad. La aplicación más común utiliza níquel como material de recubrimiento, aunque también se emplea cobre. En el *níquelado no electrolítico*, el cloruro de níquel (una sal metálica) se reduce (con hipofosfito de sodio como agente reductor) a níquel metálico, que después se deposita en la pieza de trabajo. La dureza del recubrimiento de níquel varía entre 425 y 575 HV; después se puede dar tratamiento térmico al recubrimiento a 1000 HV. El recubrimiento tiene una resistencia excelente al desgaste y a la corrosión.

Es posible recubrir con éxito cavidades, recovecos y superficies en el interior de tubos. La deposición no electrolítica también se utiliza con materiales no conductores, como plásticos y cerámicos. El proceso es más caro que la electrodeposición, pero la no electrolítica produce un espesor que siempre es uniforme, a diferencia de la electrodeposición.

Electroformado. Una variante de la electrodeposición es el *electroformado*, que es un proceso de fabricación de metal. El metal se electrodeposita en un *mandril* (también llamado *molde* o *matriz*) que después se remueve con un solvente apropiado; de manera que el recubrimiento en sí se vuelve el producto (figura 34.10). Con electroformado se pueden

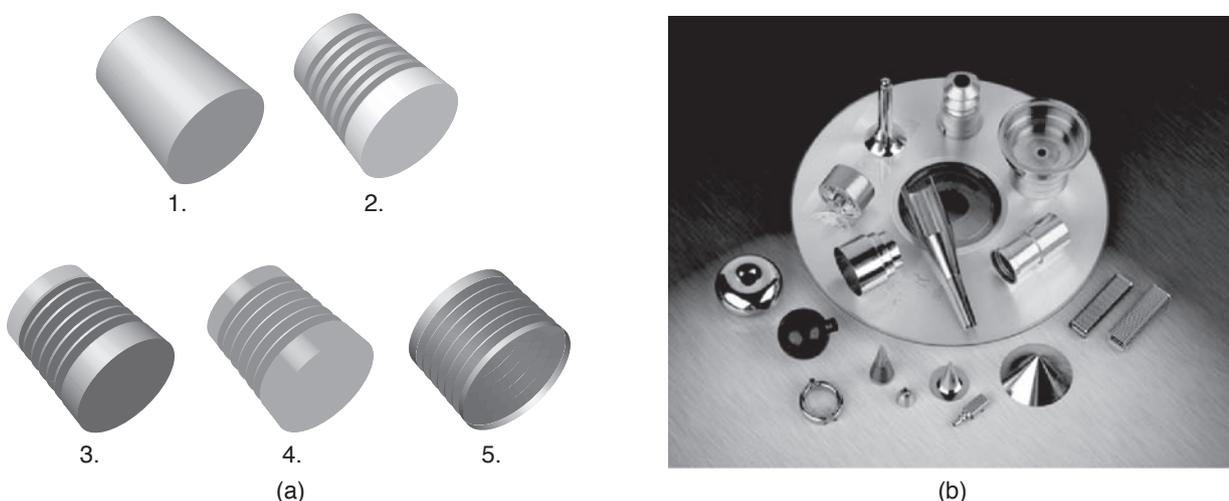


FIGURA 34.10 (a) Secuencia normal en el electroformado: (1) se selecciona un mandril con el tamaño nominal correcto. (2) Se maquina en el mandril la geometría deseada (en este caso, la de un fuelle). (3) Sobre el mandril se hace la electrodeposición del metal deseado. (4) Se recorta el material depositado, de ser necesario. (5) El mandril se disuelve con maquinado químico. (b) Conjunto de partes electroformadas. Fuente: Cortesía de Servometer®—PMG LLC, Cedar Grove, Nueva Jersey.

producir formas tanto sencillas como complejas, con espesores de pared tan pequeños como 0.025 mm (0.001 pulg). Las partes pueden pesar desde unos cuantos gramos hasta 270 kg (600 lb).

Los mandriles están hechos a partir de materiales diversos, incluyendo (a) metálicos, como zinc o aluminio; (b) no metálicos, que se hacen conductores de la electricidad con los recubrimientos apropiados; y (c) aleaciones de bajo punto de fusión, cera o plásticos, todos los cuales se funden o disuelven con los productos químicos apropiados. Los mandriles deben ser susceptibles de desprenderse físicamente de la parte electroformada sin dañarla.

El proceso de electroformado es particularmente apropiado para bajas cantidades de producción o para partes intrincadas (como moldes, dados, guía de ondas, toberas y fuelles) hechas de níquel, cobre, oro y plata. El proceso también es adecuado para aplicaciones aeroespaciales, electrónicas y electroópticas.

34.10 Recubrimientos de conversión

El *recubrimiento de conversión*, también llamado *preparación con reacción química*, es el proceso de producir un recubrimiento que se forma sobre las superficies metálicas como resultado de reacciones químicas o electroquímicas. Los óxidos que se forman naturalmente sobre las superficies (vea la sección 33.2) representan una forma de recubrimiento de conversión. Este proceso se puede aplicar a varios metales (en particular al acero, aluminio y zinc).

Para producir el recubrimiento de conversión se usan *fosfatos, cromatos y oxalatos* para propósitos como dar protección contra la corrosión, preparación del pintado y acabados decorativos. Una aplicación importante es el recubrimiento de conversión de piezas de trabajo para que sirvan como transportadores de lubricantes en las operaciones de formado en frío, en particular con recubrimientos de zinc-fosfato y oxalato (vea la sección 33.7.6). Los dos métodos comunes de recubrimiento son la *inmersión* y el *rociado*.

Anodizado. Éste es un proceso de oxidación (*oxidación anódica*) en el que las superficies de la pieza de trabajo se convierten en una capa de óxido dura y porosa, que provee resistencia a la corrosión y un acabado decorativo. La pieza de trabajo es el ánodo en la celda electrolítica inmersa en un baño de ácido, que da como resultado la adsorción química de oxígeno del baño. Se pueden usar colorantes orgánicos de varias tonalidades (por lo general negro, rojo, bronce, oro o gris) para producir películas superficiales duraderas y estables. Las aplicaciones comunes son en muebles y utensilios de aluminio, formas arquitectónicas, marcos para pinturas, llaves y artículos deportivos. Las superficies anodizadas también sirven como una buena base para pintar, en especial sobre aluminio, que de otro modo es difícil de pintar.

Colorear. Como su nombre lo indica, *colorear* involucra procesos que alteran el color de los metales, aleaciones y cerámicos. Este cambio lo causa la conversión de las superficies (por procesos químicos, electroquímicos o térmicos) en compuestos químicos como óxidos, cromatos y fosfatos. Un ejemplo es el *oscurecimiento* del hierro y de aceros, proceso que utiliza soluciones de sosa cáustica, lo que da como resultado reacciones químicas que producen una película de óxido negro y brillante sobre las superficies.

34.11 Inmersión en caliente

En la *inmersión en caliente*, la pieza de trabajo (por lo general acero o hierro) se sumerge en un baño de metal fundido, como (a) zinc, para placas de acero galvanizado y productos de plomería; (b) estaño, para el estañado de placas y latas para contenedores de comida; (c) aluminio, para aluminizar, y (d) *emplomado, aleación terne*, una aleación de plomo con una proporción de 10 a 20% de estaño. Los recubrimientos por inmersión en caliente de partes discretas dan una resistencia a la corrosión de largo plazo

a tubos galvanizados, suministros de plomería y muchos otros productos.

En la figura 34.11 se muestra una aplicación común de la línea de galvanizado por inmersión en caliente continua para láminas de acero. Primero se limpia electrolíticamente la placa laminada y se frota con cepillos. Después la lámina se recuece en un horno continuo con atmósfera y temperatura controladas, luego se sumerge en zinc fundido a una temperatura cercana a los 450 °C (840 °F).

El espesor del recubrimiento de zinc se controla con una acción limpiadora por medio de una corriente de aire o vapor, llamada *cuchillo de aire* (que también se usa en la soldadura ondulatoria; vea la figura 32.7b). Para mantener la calidad del producto es importante el drenaje apropiado para la remoción del exceso de materiales del recubrimiento. La vida de servicio depende del espesor del recubrimiento de zinc y del ambiente al que se expone el acero galvanizado. En las carrocerías de automóviles se emplean mucho las placas de acero precubiertas.

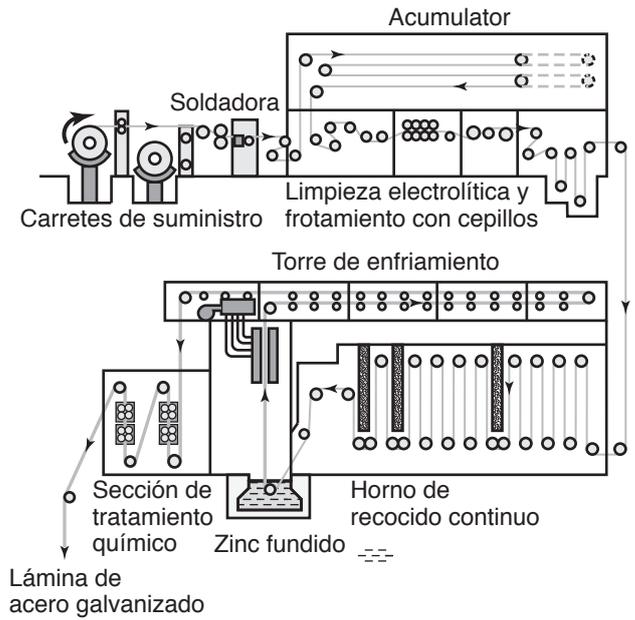


FIGURA 34.11 Línea de flujo del galvanizado continuo por inmersión en caliente de placa de acero; la soldadora (parte superior izquierda) se utiliza para soldar los extremos de los carretes para mantener el flujo continuo del material. Fuente: Cortesía de American Iron and Steel Institute.

34.12 Porcelanizado; recubrimientos cerámicos y orgánicos

Los metales se pueden recubrir con diversos revestimientos de vidrio (*vítreos*) para dar resistencia contra la corrosión y la electricidad y para protegerlos contra las temperaturas elevadas. Estos recubrimientos se suelen clasificar como **porcelanizados**, y por lo general incluyen esmaltes y cerámicas. La raíz de la palabra “porcelana” es *porcellana*, palabra italiana que significa “concha marina”. Observe que la palabra *esmalte* se utiliza también para designar pinturas vítreas, lo que indica un recubrimiento duro y suave.

Esmaltes. Los esmaltes de porcelana son recubrimientos vítreos inorgánicos que constan de varios óxidos metálicos y existen en diferentes colores y transparencias. El *esmalado* (que en la Edad Media ya era un arte plenamente desarrollado) implica la fusión del material de recubrimiento en el sustrato a temperaturas de 425 a 1000 °C (800 a 1800 °F) para licuar los óxidos. El recubrimiento se puede aplicar por inmersión, rociado o electrodeposición, y los espesores por lo general están en el rango de 0.05 a 0.6 mm (0.002 a 0.025 pulg). La viscosidad del material se puede controlar utilizando aglutinantes, de modo que el revestimiento se adhiera a superficies verticales durante su aplicación. En función de su composición, los esmaltes varían su resistencia a los álcalis, ácidos, detergentes, limpiadores y al agua.

Las aplicaciones comunes para el porcelanizado son utensilios domésticos, accesorios de plomería, equipo de procesamiento químico, señalamientos, equipos de cocina y joyería; también se usan como recubrimientos protectores en componentes de motores de reacción. Los metales que se recubren son aceros, hierro fundido y aluminio. Para tener resistencia química se usan vidrios como forro, cuyo espesor es mucho más grande que el del esmalte. El **vidriado** es la aplicación de recubrimientos vítreos sobre artículos de porcelana para darles acabados decorativos y hacerlos impermeables a la humedad.

Recubrimientos cerámicos. Los cerámicos, como los óxidos de aluminio y de circonio, se aplican a un sustrato a temperatura ambiente por medio de aglutinantes, después se cuecen en un horno para fundir el material de recubrimiento. Estos revestimientos se suelen aplicar con técnicas de rociado térmico y actúan como barreras térmicas para álabes de turbina, componentes de motores diesel, dados de extrusión en caliente y toberas para motores de cohetes con objeto de aumentar la vida de dichos compo-

mentos. También se usan en aplicaciones de resistencia a la electricidad para mantener un arco repetido.

Recubrimientos orgánicos. Las superficies de metal se pueden cubrir o precubrir con varios revestimientos orgánicos, películas y laminados con el fin de mejorar su apariencia y resistencia a la corrosión. Los recubrimientos se aplican al lote de artículos en líneas continuas (vea la figura 13.10), con espesores que por lo general están en el rango de 0.0025 a 0.2 mm (0.0001 a 0.008 pulg). Los recubrimientos orgánicos tienen un amplio rango de propiedades como flexibilidad, durabilidad, dureza, resistencia a la abrasión y productos químicos, color, textura y lustre. Posteriormente se da a las placas metálicas recubiertas la forma de diversos productos como gabinetes, cubiertas de aparatos, paneles, anaqueles, estacionamientos (aparcaderos) residenciales, alcantarillas y muebles de metal.

Entre las aplicaciones críticas de los recubrimientos orgánicos están, por ejemplo, la protección de la aviación naval, que está sujeta a mucha humedad, lluvia, agua de mar, contaminantes, combustible de aviones, fluidos del deshielo y ácido de baterías, así como a los impactos de partículas tales como polvo, grava y sales de deshielo. Para las estructuras de aluminio, los recubrimientos orgánicos consisten en general de una base epóxica y una capa superior de poliuretano.

EJEMPLO 34.2 Recubrimientos cerámicos para aplicaciones de alta temperatura

La tabla 34.1 muestra varios recubrimientos de material cerámico y sus aplicaciones más frecuentes a temperaturas elevadas. Estos recubrimientos se aplican ya sea

solos o en capas, cada capa con sus propias cualidades especiales, como ocurre en las herramientas de corte recubiertas con capas múltiples (vea la figura 22.8).

TABLA 34.1

Recubrimientos cerámicos usados para aplicaciones de alta temperatura

Propiedad	Tipo de cerámico	Aplicaciones
Resistencia al desgaste	Óxido de cromo, óxido de aluminio, titanato de aluminio.	Bombas, ejes de turbina, sellos y cilindros de compresores para la industria petrolera; barriles extrusores de plásticos; dados de extrusión.
Aislamiento térmico	Óxido de circonio (ytrio estabilizado), óxido de circonio (calcio estabilizado), zirconato de magnesio.	Aspas de ventiladores, aspas de compresores y sellos para turbinas de gas; válvulas, pistones y cabezales de combustión para motores de automóvil.
Aislamiento eléctrico	Aluminato de magnesio, óxido de aluminio.	Bobinas de inducción, accesorios de soldadura fuerte, aplicaciones eléctricas en general.

34.13 Recubrimientos de diamante y de carbono similar al diamante

Las propiedades del *diamante* que son relevantes para la ingeniería de manufactura se describieron en la sección 8.7. Se han hecho avances importantes en el *recubrimiento con diamante* de metales, vidrio, cerámicos y plásticos, aplicando varias técnicas como la deposición química de vapor, deposición de vapor asistida por plasma y la deposición iónica con haces mejorada.

Algunos ejemplos de productos recubiertos con diamante son las ventanas a prueba de rayones, como las que se utilizan en los aviones y vehículos militares para protección durante tormentas de arena; herramientas de corte como insertos, brocas y fresas de acabado; caras de desgaste de micrómetros y calibradores; bisturíes, rasuradoras; rastrea-

dores de calor y sensores infrarrojos; diodos emisores de luz; micrófonos para equipos estereofónicos; álabes de turbina y toberas de inyección de combustible.

También se han desarrollado técnicas para producir **películas de diamante independientes**, del orden de 1 mm (0.04 pulg) de espesor y hasta 125 mm (5 pulg) de diámetro. Estas películas incluyen películas suaves y ópticamente transparentes de diamante, que después se cortan con láser en las formas deseadas y se colocan en las piezas de trabajo mediante soldadura fuerte.

También se realizan estudios acerca del crecimiento de películas de diamante sobre sustratos de cobre cristalino, por implantación de iones de carbono. Una aplicación importante es la fabricación de chips de computadora (consulte el capítulo 28, en el sitio web del libro). El diamante se puede dopar para que forme extremos tipo p y n sobre los semiconductores con el fin de fabricar transistores, además su alta conductividad térmica permite el empaque más cerrado de chips de lo que sería posible si estuvieran hechos de silicio o arseniuro de galio, lo que incrementa de manera significativa la velocidad de las computadoras. El diamante es también un material atractivo para dispositivos MEMS (del inglés microelectromechanical systems) (consulte el capítulo 29, en inglés en el sitio web del libro), gracias a sus características favorables con respecto a la fricción y el desgaste.

Carbono similar al diamante. Los recubrimientos de *carbono similar al diamante* (DLC, por sus siglas en inglés), con espesor de unos cuantos nanómetros, se producen con un proceso de deposición asistido por haz de iones a baja temperatura. La estructura del DLC se encuentra entre la del diamante y la del grafito (sección 8.6). Es menos caro que las películas de diamante pero con propiedades similares (como fricción baja, dureza alta y es inerte en lo químico, así como una superficie suave), el DLC tiene aplicaciones en áreas como la fabricación de herramientas y dados, componentes de motores, engranes, rodamientos, dispositivos MEMS y sondas a microescala. Como recubrimiento de herramientas de corte, el DLC tiene una dureza de alrededor de 5000 HV, casi el doble que el de diamante.

34.14 Texturizado de la superficie

Recordemos que cada proceso de manufactura produce una superficie de cierta textura, acabado y aspecto. Sin embargo, las superficies manufacturadas se pueden modificar con operaciones secundarias por razones de funcionamiento, ópticas o estéticas.

Dichas operaciones secundarias, llamadas *texturizado de la superficie*, por lo general consisten en las siguientes técnicas:

- **Grabado** (ataque químico), que usa productos químicos o técnicas de pulverización.
- **Arcos eléctricos.**
- **Láseres**, que usan pulsos de láser excimer.
- **Oxígeno atómico**, que reacciona con las superficies para producir en la superficie una textura fina de conos.

Los posibles efectos benéficos, así como los perjudiciales, de estos procesos adicionales sobre las propiedades de los materiales y el desempeño de las partes texturizadas son consideraciones importantes. Por lo general, el desempeño se relaciona con el aspecto o las características tribológicas. Por ejemplo, una superficie rugosa ayuda a reciclar el combustible y a reducir la fricción, pero también la aumenta en los contactos no lubricados.

34.15 Pintura

Debido a sus propiedades decorativas y funcionales, como la protección del ambiente, bajo costo, facilidad relativa de aplicación y el rango de colores disponibles, la *pintura* se ha utilizado mucho por miles de años como recubrimiento de una superficie y como decoración. Las pinturas por lo general se clasifican como sigue:

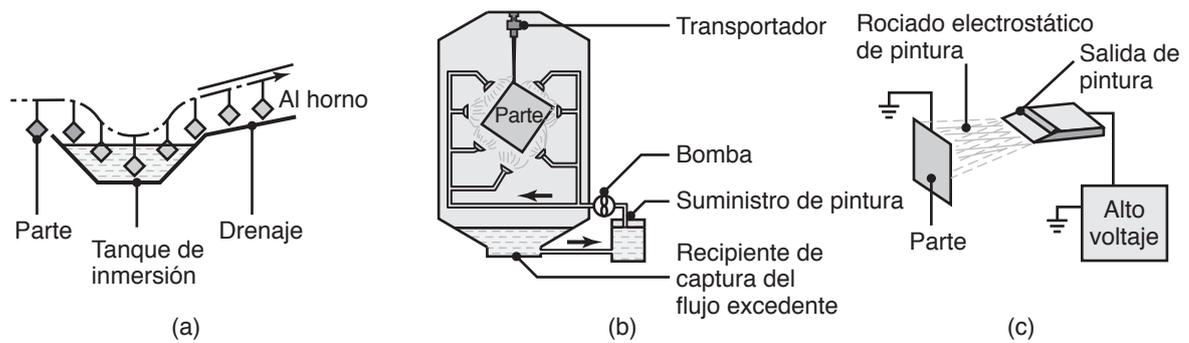


FIGURA 34.12 Métodos de aplicación de pintura: (a) recubrimiento por inmersión; (b) recubrimiento por flujo y (c) rociado electrostático (usado en particular para carrocerías de automóvil).

- **Esmaltes**, producen un recubrimiento suave con aspecto lustroso o parcialmente lustroso.
- **Barnices**, forman una película adhesiva por evaporación de un solvente.
- **Pinturas base agua**, se aplican con facilidad, pero tienen una superficie porosa y absorben agua, lo que las hace más difíciles de limpiar.

Hoy existen pinturas con buena resistencia a la abrasión, a altas temperaturas y a la pérdida de color. Su selección depende de los requerimientos específicos, como la resistencia a acciones mecánicas (abrasión, marcas, impactos y flexiones) y a reacciones químicas (ácidos, solventes, detergentes, álcalis, combustibles, oxidación y al ataque del ambiente en general).

Los métodos comunes de aplicación de pintura son por inmersión, brochado, con rodillo y rociado (figura 34.12). En el **electrorrecubrimiento** o en el **rociado electrostático**, las partículas de pintura se cargan *electrostaticamente* y son atraídas hacia las superficies que se van a pintar, lo que produce un recubrimiento adhesivo uniforme. A diferencia de las pérdidas de pintura con el rociado convencional, que llegan a ser hasta de 70%, con el rociado electrostático las pérdidas son muy pequeñas, del orden de 10%. Sin embargo, con este método las cavidades profundas y las esquinas son difíciles de recubrir. Ahora es práctica común el uso de *controles robotizados* para guiar las boquillas de rociado (sección 37.6.3).

34.16 Limpieza de las superficies

En muchos de los capítulos del libro se ha hecho énfasis en la importancia de las superficies en la manufactura y en los efectos que ejercen en las características de las superficies las capas depositadas o adsorbidas de varios contaminantes. La palabra **limpieza** o *grado de limpieza* de una superficie es algo difícil de definir; dos pruebas comunes y sencillas son las siguientes:

1. Observar si el agua cubre la superficie en forma continua y uniforme, lo que se conoce como prueba de la *interrupción del agua*; si el agua se agrupa como gotas individuales, la superficie no está limpia (este fenómeno se observa con facilidad al humedecer platos de comida que se hayan lavado con diferentes grados de limpieza).
2. Frotar la superficie con una tela blanca y limpia y observar cualesquiera residuos que queden en la tela.

Una superficie limpia puede tener efectos benéficos o perjudiciales. Aunque una que no esté limpia reduciría la tendencia a la adhesión durante un deslizamiento (lo que disminuiría la fricción), la limpieza por lo general es esencial para una aplicación más eficaz de los recubrimientos, la pintura, uniones adhesivas, soldadura fuerte y blanda, así como

para el funcionamiento confiable de las partes móviles de las máquinas, las operaciones de ensamblado y para contenedores de alimentos y bebidas.

La *limpieza* comprende la remoción de contaminantes sólidos, semisólidos o líquidos de una superficie, es parte importante de las operaciones de manufactura y de la economía de producción. En las operaciones de manufactura, el tipo de proceso de limpieza que se requiere depende del tipo de *residuos del trabajo del metal* y los fluidos y de los *contaminantes* por eliminar. Por ejemplo, los fluidos base agua son más fáciles y menos caros de remover que los fluidos base aceite. Los contaminantes (también llamados mugre) consisten en herrumbre, cascarilla, virutas, varios residuos metálicos y no metálicos, fluidos del trabajo del metal, lubricantes sólidos, pigmentos, compuestos del pulido y lapeado y elementos del ambiente general.

Básicamente hay tres tipos de métodos de limpieza:

Limpieza mecánica. Esta operación consiste en retirar físicamente los contaminantes, con un cepillo de alambre o fibras, bombardeo abrasivo, volteado o chorros de vapor. Muchos de estos procesos son particularmente eficaces para remover herrumbre, cascarillas y otros contaminantes sólidos de las superficies. En esta categoría también se encuentra la *limpieza ultrasónica*.

Limpieza electrolítica. Se aplica una carga eléctrica a la parte que se ha de limpiar, en una solución acuosa limpiadora (alcalina, con frecuencia); la carga provoca burbujas de hidrógeno u oxígeno (depende de la polaridad) que se liberan en la superficie; las burbujas son abrasivas y ayudan a retirar los contaminantes.

Limpieza química. La limpieza química por lo general involucra la remoción de aceite y grasa de las superficies; esta operación consiste en uno o más de los siguientes procesos:

- **Solución:** la mugre se disuelve en la solución limpiadora.
- **Saponificación:** una reacción química convierte los aceites animales o vegetales en un jabón soluble en agua.
- **Emulsionado:** la solución limpiadora reacciona con los depósitos de mugre o lubricante y forma una emulsión; después, la mugre y el emulsionante quedan en suspensión en la emulsión.
- **Dispersión:** la concentración de mugre en la superficie disminuye debido a los elementos activos en la solución limpiadora.
- **Agregación:** los lubricantes se eliminan de la superficie por la acción de varios agentes en el limpiador y se agrupan como grandes partículas de suciedad.

Fluidos limpiadores. Los fluidos limpiadores más comunes, que se usan junto con procesos electroquímicos para una limpieza más eficaz, incluyen los siguientes:

- **Soluciones alcalinas:** combinación compleja de productos químicos solubles en agua, las soluciones alcalinas son los fluidos limpiadores menos caros y más usados en las operaciones de manufactura. Las partes pequeñas se pueden limpiar en tambores o barriles rotatorios. La mayoría de las partes se limpia en bandas transportadoras continuas al rociarlas con la solución y luego enjuagarlas con agua.
- **Emulsiones:** las emulsiones consisten por lo general en queroseno y agua con aceite y varios tipos de emulsionantes.
- **Solventes:** por lo general los solventes del petróleo, hidrocarburos clorados y alcoholes minerales solventes se usan en operaciones breves. El fuego y su toxicidad son riesgos importantes.
- **Vapores calientes:** los solventes clorados se usan para remover aceite, grasa y cera. Primero se hierve el solvente en un contenedor y luego se condensa y colecta para reusarlo. Este proceso de vapor caliente se conoce también como **desgrasado con vapor**, es sencillo y las partes que se limpian quedan secas. Los solventes nunca

se diluyen ni pierden efectividad por la disolución de aceite, ya que éste no se evapora.

- **Ácidos, sales y mezclas de compuestos orgánicos:** son eficaces para limpiar partes cubiertas con pastas pesadas o depósitos aceitosos o herrumbrosos.

Lineamientos de diseño para la limpieza. La limpieza de partes discretas con formas complejas puede ser difícil. Algunos lineamientos básicos de diseño incluyen (a) evitar los orificios profundos y ciegos; (b) fabricar varios componentes pequeños en lugar de uno solo grande, que puede ser difícil de limpiar y (c) proveer perforaciones de drenaje apropiadas en las partes que se han de limpiar.

El *tratamiento y eliminación* de los fluidos limpiadores, así como los diferentes fluidos y materiales de desecho de los procesos descritos en este capítulo, están entre las consideraciones más importantes para las operaciones de manufactura seguras para el ambiente (vea también la sección I.4).

RESUMEN

- Los tratamientos de la superficie son un aspecto importante de todas las operaciones de manufactura. Se usan para dar propiedades mecánicas, químicas y físicas específicas, como la apariencia y la resistencia a la corrosión, fricción, desgaste y fatiga.
- Los procesos aplicados incluyen tratamientos de trabajo mecánico y superficial, como tratamiento térmico, deposición y revestido. Entre los recubrimientos de la superficie están los esmaltes, materiales no metálicos y pinturas.
- Las superficies limpias son importantes en el procesamiento posterior, como el recubrimiento, pintura y soldadura y en el uso del producto. La limpieza tiene un impacto significativo en la rentabilidad de las operaciones de manufactura.

TÉRMINOS CLAVE

Anodizado	Deposición química de vapor	Inmersión en caliente	Recubrimiento de diamante
Boleado	Electrodeposición	Limpieza química	Recubrimiento por difusión
Bruñido con rodillos	Electroformado	Metalización	Revestimiento duro
Carbono similar al diamante	Endurecimiento explosivo	Oscurecimiento	Rociado
Chapeado mecánico	Endurecimiento superficial	Película de diamante independiente	Rociado térmico
Colorear	Esmalte	Pintura	Texturizado de la superficie
Deposición de vapor	Evaporación al vacío	Porcelanizado	Vidriado
Deposición dura de cromo	Fluidos limpiadores	Prueba de la interrupción del agua	
Deposición física de vapor	Granallado	Pulverización catódica	
Deposición iónica	Granallado con chorro de agua	Recubrimiento de conversión	
Deposición mecánica	Granallado con láser		
Deposición no electrolítica	Implantación iónica		

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, Vol. 5, Surface Engineering, ASM International, 1994.

Bunshah, R. F. (ed.), Handbook of Hard Coatings: Deposition Technologies, Properties and Applications, William Andrew, 2002.

Davis, J. R. (ed.), Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, ASM International e IOM Communications, 2001.

Davis, J. R. (ed.), Surface Hardening of Steels, ASM International, 2002.

- Polak, T. A. (ed.), *Handbook of Surface Treatments and Coatings*, ASME Press, 2003.
- Roberge, P. R., *Handbook of Corrosion Engineering*, 2a. ed., McGraw-Hill, 2012.

- Schulze, V., *Modern Mechanical Surface Treatment*, Wiley-VCH, 2006.
- Tracton, A. A. (ed.), *Coatings Technology Handbook*, 3a. ed., CRC Press, 2005.

PREGUNTAS DE REPASO

- 34.1** Explique por qué los tratamientos de la superficie son necesarios para las diferentes partes fabricadas con uno o más procesos.
- 34.2** ¿Qué es el granallado? ¿Por qué se lleva a cabo?
- 34.3** ¿Cuáles son las ventajas del bruñido con rodillos?
- 34.4** Explique la diferencia entre el endurecimiento superficial y el revestimiento duro.
- 34.5** Describa los principios de la deposición física y química de vapor. ¿Qué aplicaciones tienen estos procesos?
- 34.6** Revise la figura 34.2 y describa los principios en que se basa el rociado térmico.
- 34.7** ¿Qué es la electrodeposición? ¿Por qué puede ser peligrosa?
- 34.8** ¿Cuál es el principio del electroformado? ¿Cuáles son sus ventajas?
- 34.9** Explique la diferencia entre la electrodeposición y la deposición no electrolítica.
- 34.10** ¿Cómo se ejecuta la inmersión en caliente?
- 34.11** ¿Qué es un cuchillo de aire? ¿Cómo funciona?
- 34.12** Describa los sistemas comunes de pintura que existen en el presente en la industria.
- 34.13** ¿Qué es un recubrimiento de conversión? ¿Por qué se llama así?
- 34.14** Describa la diferencia entre el rociado térmico y el rociado por plasma.
- 34.15** ¿Qué es el chapeado mecánico y por qué se lleva a cabo?
- 34.16** ¿Cómo se producen los recubrimientos de diamante?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 34.17** Describa la forma en que los procesos de bruñido con rodillos inducen esfuerzos residuales de compresión sobre las superficies de las partes.
- 34.18** Explique por qué ciertas partes se recubren con cerámicos. Dé algunos ejemplos.
- 34.19** Ponga en una lista y describa brevemente cinco técnicas de tratamiento de superficies que usen láseres.
- 34.20** Dé ejemplos de diseños de parte que son apropiados para el galvanizado por inmersión en caliente.
- 34.21** Comente sus observaciones con respecto a la figura 34.9.
- 34.22** Es bien sabido que los recubrimientos se pueden remover o desgastar durante la vida de servicio de los componentes, en particular con temperaturas elevadas. Describa los factores involucrados en la resistencia y durabilidad de los recubrimientos.
- 34.23** Haga una lista de los procesos de recubrimiento descritos en este capítulo y clasifíquelos en términos relativos tales como “grueso” o “delgado”.
- 34.24** Clasifique los procesos de recubrimiento descritos en este capítulo de acuerdo con (a) el espesor máximo que generalmente se alcanza y (b) el tiempo normal que toma la operación de recubrir.
- 34.25** ¿Por qué es importante el galvanizado para las carrocerías metálicas de los automóviles?
- 34.26** Explique los principios involucrados en las diferentes técnicas de aplicación de pinturas.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

- 34.27** Tome un ejemplo sencillo, como el de las partes que se muestran en la figura 34.1, y estime la fuerza requerida para el bruñido con rodillos. (*Sugerencia:* consulte las secciones 2.6 y 14.4).
- 34.28** Estime el espesor del recubrimiento en la electrodeposición de una esfera sólida de metal de 20 mm, con el uso de una corriente de 10 A y un tiempo de 1.5 h. Suponga que $c = 0.08$ en la ecuación (34.1).

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

- 34.29** ¿Cuáles tratamientos de la superficie están dirigidos a la función y cuáles son decorativos? ¿Hay algún tratamiento que sirva para ambos fines? Explique.
- 34.30** Un implante artificial tiene un área superficial porosa donde se espera que el hueso se adhiera y crezca dentro del implante. Sin consultar la bibliografía, haga recomendaciones

para producir una superficie porosa; después revise la bibliografía y describa los procesos reales que se utilizan.

34.31 Si alguien se interesa en obtener una superficie texturizada sobre una pieza de metal recubierta, ¿debe aplicarse primero el recubrimiento o la textura? Explique.

34.32 Se sabe que una superficie con acabado a espejo se puede obtener revistiendo las piezas de trabajo originales; es decir, el acabado de la superficie mejora después del recubrimiento. Explique cómo ocurre esto.

34.33 Se ha observado en la práctica que una capa delgada de recubrimiento de cromo, como el de las defensas de un automóvil de modelo antiguo, es mejor que una gruesa. Explique por qué, si se considera el efecto del espesor en la tendencia a formar grietas.

34.34 Mencione las razones por las que los temas descritos en este capítulo son importantes en los procesos y operaciones de manufactura.

34.35 Los globos metálicos brillantes tienen patrones festivos impresos que se producen por impresión de pantallas para luego depositarlas en los globos. ¿Cómo pueden depositarse recubrimientos metálicos en una hoja de caucho?

34.36 Debido a que se evaporan, los solventes y soluciones de limpieza parecidos tienen efectos perjudiciales en el ambiente. Describa sus reflexiones sobre las modificaciones que podrían

hacerse para que dichas soluciones fueran más amigables con el ambiente.

34.37 Se lleva a cabo una operación de bruñido con rodillos sobre el hombro de un eje con el fin de mejorar su vida de fatiga. Se observa que el acabado resultante de la superficie es deficiente y se hace una propuesta de maquinarse la capa superficial para mejorar su vida de fatiga. ¿Es aconsejable esto? Explique.

34.38 El proceso de granallado se puede demostrar con un martillo de bola (en el que una de las cabezas es redonda). Con dicha herramienta haga numerosas marcas en la superficie de una placa de aluminio (a) de 2 mm y de (b) 10 mm de grueso, respectivamente, colocada en una superficie plana y dura como un yunque. Observe que ambas piezas desarrollan curvaturas, pero una se vuelve cóncava y la otra convexa. Describa sus observaciones y explique por qué pasa esto (*Sugerencia*: vea la figura 2.14).

34.39 Obtenga varias piezas de partes metálicas pequeñas (como pernos, barras y placas) y realice en ellas la prueba de la interrupción del agua. Después lave las superficies con varios fluidos limpiadores y repita la prueba. Describa sus observaciones.

34.40 Inspeccione varios productos grandes y pequeños como aparatos, platería, jarrones y cajas metálicas, utensilios de cocina y herramientas de mano y comente acerca del tipo de recubrimientos que tengan y las razones por las que se recubrieron.

Metrología, instrumentación y aseguramiento de la calidad en la ingeniería

P A R T E

VIII

La gran mayoría de partes manufacturadas son componentes de un subensamble de algún producto y deben ajustarse y ensamblarse de manera adecuada con el fin de que el producto realice durante su vida de servicio la función para la que fue planeado. Las dimensiones y otras características de una parte manufacturada se miden para garantizar que se fabricó de manera consistente y dentro del rango especificado de tolerancias dimensionales. Observe, por ejemplo, que (a) un pistón debe ajustar dentro de un cilindro con tolerancias específicas, (b) un álabe de turbina debe encajar en forma apropiada en su ranura en el disco de la turbina y (c) los carros de una máquina herramienta deben producirse con cierta exactitud, de manera que las partes producidas en la máquina sean exactas con respecto a sus especificaciones.

La medición de las dimensiones relevantes de un objeto es un aspecto integral de la **manufactura de partes intercambiables**, lo cual es el concepto básico tras la estandarización y la producción en masa. Si, por ejemplo, un balero de un aparato se desgasta y tiene que ser reemplazado, todo lo que hay que hacer es comprar otro igual con la misma especificación o número de parte.

El primero de los dos capítulos siguientes describe los principios involucrados en los diferentes instrumentos y máquinas modernas que se usan para medir las características dimensionales, como son longitud, ángulo, planicidad y redondez. Otros aspectos de igual importancia en las operaciones de manufactura son la prueba e inspección de las partes; por esta razón también se describen los métodos utilizados para efectuar pruebas no destructivas y destructivas.

La **calidad del producto** es uno de los aspectos más importantes de la manufactura, como se describe en el capítulo 36, en el cual se estudia la importancia tecnológica y económica de construir la calidad *en* un producto en lugar de inspeccionarla *después* de haberlo fabricado, como se ha hecho tradicionalmente por siglos.

35.1	Introducción	1008
35.2	Patrones de medición	1008
35.3	Características geométricas de las partes: mediciones analógicas y digitales	1010
35.4	Métodos e instrumentos de medición tradicionales	1010
35.5	Instrumentos y máquinas modernos de medición	1017
35.6	Medición automatizada	1020
35.7	Características generales y selección de los instrumentos de medición	1021
35.8	Dimensionamiento geométrico y tolerancias	1021

EJEMPLOS:

35.1	La medición de la longitud a través de la historia	1009
35.2	Máquina de medición por coordenadas para carrocerías de automóviles	1020

- Este capítulo describe la importancia de la medición de partes manufacturadas, con la observación de que la medición y su certificación a cierto estándar son esenciales para garantizar su ajuste y operación apropiados.
- En el presente existe una amplia variedad de técnicas, calibradores, instrumentos y máquinas para medir, como se describe e ilustra en este capítulo.
- El capítulo también describe las características de la medición automatizada y termina con una introducción a los principios de dimensionamiento y tolerancias.

35.1 Introducción

La metrología en la ingeniería (metrología industrial) se define como la medición de las dimensiones de longitud, espesor, diámetro, inclinación, ángulo, planicidad y perfiles. Observe que éstas son mediciones *geométricas*; en la metrología no se incluye la medición de las propiedades mecánicas y físicas. Por ejemplo, considere los carros de las máquinas herramienta (figura 35.1; vea también las figuras 23.2, 24.18 y 25.11); estos componentes deben tener dimensiones, ángulos y planicidad específicos para que la máquina herramienta funcione adecuadamente y dentro de la exactitud dimensional especificada.

Ha sido tradicional que las mediciones se hagan después de que la parte ha sido producida, un método conocido como **inspección posproceso**. Aquí, el término *inspección* significa verificación de las dimensiones de lo que se ha fabricado o se está fabricando y determinación de si dichas dimensiones cumplen con las especificaciones establecidas para las tolerancias y de otro tipo. Hoy día, las mediciones se efectúan *durante* la producción de la parte en la máquina, enfoque conocido como **inspección en proceso, en línea o en tiempo real**.

Un aspecto importante de la metrología es la **tolerancia dimensional**, definida como la variación permisible en las dimensiones de una parte. Las tolerancias son importantes debido a su rol crucial en la posibilidad de intercambiar la parte, el funcionamiento del producto y los costos de manufactura; sin embargo, por lo general, cuanto más pequeña sea la tolerancia más elevados serán los costos de producción.

35.2 Patrones de medición

Es común que nuestra primera experiencia con la *medición* sea por medio de una sencilla *regla*, empleada para medir la **longitud**. Las reglas se usan como el *patrón* contra el que se miden las dimensiones. En Estados Unidos, por tradición se han utilizado, y se siguen utilizando, las unidades *pulgada* y *pie*, que originalmente se basaban en partes del cuerpo humano (vea el ejemplo 35.1); en consecuencia, era común encontrar variaciones significativas en la longitud de un pie.

No obstante, en la mayor parte del mundo se utiliza el *metro* como el patrón para la longitud. Originalmente, un metro se definía como la diezmillonésima parte de la distancia entre el Polo Norte y el Ecuador. Tiempo después el metro se estandarizó como la distancia entre dos marcas hechas en una barra de platino-iridio, la cual se conserva en condiciones controladas en un edificio en las afueras de París. En 1960 se definió oficialmente al metro como 1 650 763.73 longitudes de onda, excitadas por electricidad en un vacío, de la luz naranja emitida por el kriptón 86, un gas raro. La precisión de esta medida se fijó como de una parte en 10^9 . Actualmente el metro es el patrón internacional de longitud en el Sistema Internacional de Unidades (SI).

En la metrología industrial se emplean numerosos instrumentos y aparatos de medición, cada uno de los cuales tiene su propia resolución, precisión y otras características. Para describir el tipo y calidad de un instrumento es común utilizar dos términos:

1. **Resolución:** es la diferencia más pequeña en las dimensiones que es capaz de detectar o distinguir un instrumento de medición; por ejemplo, una regla de madera tiene mucho menos resolución que un micrómetro.
2. **Precisión:** aunque de manera incorrecta a veces se le llame exactitud, la precisión es el grado en que el instrumento produce mediciones repetidas del mismo patrón. Por ejemplo, una regla de aluminio se expandirá o contraerá dependiendo de las variaciones de la temperatura del ambiente en que se utiliza; por tanto, su precisión puede ser afectada incluso cuando se le sostiene en una mano.

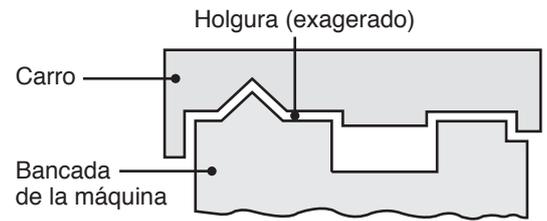


FIGURA 35.1 Sección transversal del carro de una máquina herramienta; ancho, profundidad, ángulos, y otras dimensiones deben producirse y medirse con exactitud para que la máquina funcione según fue diseñada.

EJEMPLO 35.1 La medición de la longitud a través de la historia

Durante los últimos 6000 años se han desarrollado varios patrones para medir la longitud. En Egipto, alrededor de 4000 a. de C., un patrón común era el codo del rey, que era equivalente a 0.4633 m. Un *codo* era igual a 1.5 pies (o dos extensiones* de la mano, 6 anchos de la mano o 24 espesores de un dedo). En 1101 el rey Enrique I de Inglaterra decretó un nuevo patrón, llamado *yarda* (0.9144 m); era la distancia de su nariz al extremo de su dedo pulgar.

Durante la Edad Media casi cada reino y ciudad tenían establecido su propio patrón de longitud, algunos de los cuales tenían nombres idénticos. En 1528, el físico francés Jean Fernel propuso la distancia entre París y Amiens, ciudad ubicada 120 km al norte de París, como la referencia general para la longitud. Durante el siglo XVII algunos científicos sugirieron que se empleara como patrón la longitud de cierto péndulo. En 1661, el arquitecto británico Sir Christopher Wren sugirió se utilizara un péndulo con un periodo de medio segundo. El matemático holandés Christian Huygens propuso un péndulo que tenía un tercio de la longitud del de Wren y un periodo de un segundo.

Para terminar con la confusión tan extendida de la medición de la longitud, comenzó a desarrollarse en Francia un patrón definitivo, con el concepto de un *metro* (de la palabra griega *metron*, que significa “medida”). Se elaboró un bloque patrón de un metro de longitud, hecho de platino puro y sección transversal rectangular, el cual se colocó en 1799 en el Archivo Nacional, en París. Con el paso de los años se fabricaron duplicados de este patrón para usarlos en otros países.

Durante el periodo de 1870 a 1872 se reunieron comités internacionales y decidieron con respecto a un patrón internacional para el *metro*. Se hizo una nueva barra con 90% de platino y 10% de iridio, con sección transversal en forma de X y dimensiones de 20 mm × 20 mm. En cada extremo de la barra se grabaron tres marcas; el metro patrón era la distancia entre las marcas centrales practicadas en cada extremo medido a 0 °C. Hoy, una medición de exactitud extrema se basa en la *velocidad de la luz en el vacío*, la cual se calcula multiplicando la longitud de onda del haz infrarrojo estandarizado de un rayo láser por su frecuencia.

* (Nota del revisor). En México, a la distancia entre las puntas del meñique y el pulgar de una mano extendida al máximo se le llama “cuarta”.

35.3 Características geométricas de las partes: mediciones analógicas y digitales

En esta sección se describen las cantidades y características geométricas de uso más común en la práctica de la ingeniería.

- **Longitud**, incluye todas las dimensiones lineales de las partes.
- **Diámetro**, incluye los diámetros externo e interno.
- **Redondez**, incluye la redondez exterior, el carácter concéntrico y la excentricidad.
- **Profundidad**, como la de agujeros y cavidades perforados en troqueles y moldes.
- **Rectitud**, por ejemplo la de ejes, barras y tubos.
- **Planicidad**, en superficies maquinadas, en bruto y pulidas.
- **Paralelismo**, como el de dos ejes o superficies de deslizamiento en una máquina.
- **Perpendicularidad**, por ejemplo la de una barra con rosca insertada en una placa plana.
- **Ángulos**, se incluyen los internos y externos.
- **Perfiles**, como las curvaturas de partes elaboradas con distintos procesos.

En el presente existe una amplia variedad de instrumentos y máquinas para medir las cantidades anteriores con exactitud y rapidez, ya sea de partes estacionarias o que se encuentran en producción continua. En la metrología industrial es frecuente usar las palabras **instrumento** y **calibrador** de manera indistinta. Debido a las tendencias principales en la automatización y control computarizado de las operaciones de manufactura (vea la parte IX), el equipo moderno de medición e instrumentación ahora es una *parte integral de la maquinaria de producción*. La implementación de instrumentos y dispositivos **digitales** en la manufactura integrada por computadora han llevado de manera conjunta a la integración total de las tecnologías de medición dentro de los sistemas de manufactura.

El control de la temperatura es muy importante, en particular para hacer mediciones con instrumentos de precisión. La temperatura estándar de medición es de 20°C (68°F), y todos los equipos se calibran a esta temperatura. En nombre de la exactitud (precisión), las mediciones deben tomarse en ambientes controlados que mantengan la temperatura estándar, por lo general con una tolerancia de ± 0.3 °C (0.5 °F).

Un instrumento **analógico**, como el vernier o el micrómetro (figura 35.2a), se basa en la habilidad del operador para interpolar en forma apropiada y leer las escalas graduadas. En contraste, en un micrómetro digital las mediciones se indican directamente (figura 35.2b). Más importante aún, el equipo digital se puede integrar con facilidad en otros equipos (figura 35.2c), inclusive en maquinaria y sistemas de producción para el control estadístico del proceso (SPC, por sus siglas en inglés), como se describe en el capítulo 36.

35.4 Métodos e instrumentos de medición tradicionales

35.4.1 Instrumentos con graduación

El término *graduada* significa marcada para indicar cierta cantidad; estos instrumentos se utilizan para medir longitudes o ángulos.

Medición lineal (lectura directa)

- **Reglas**: el instrumento más simple y de uso más común para hacer mediciones lineales es una *regla de acero* (*regla de mecánico*), barra, o cinta, con graduaciones en fracciones o decimales. Las longitudes se miden directamente, con una exactitud limitada a la graduación más cercana, por lo general de 1 mm (0.040 pulg).

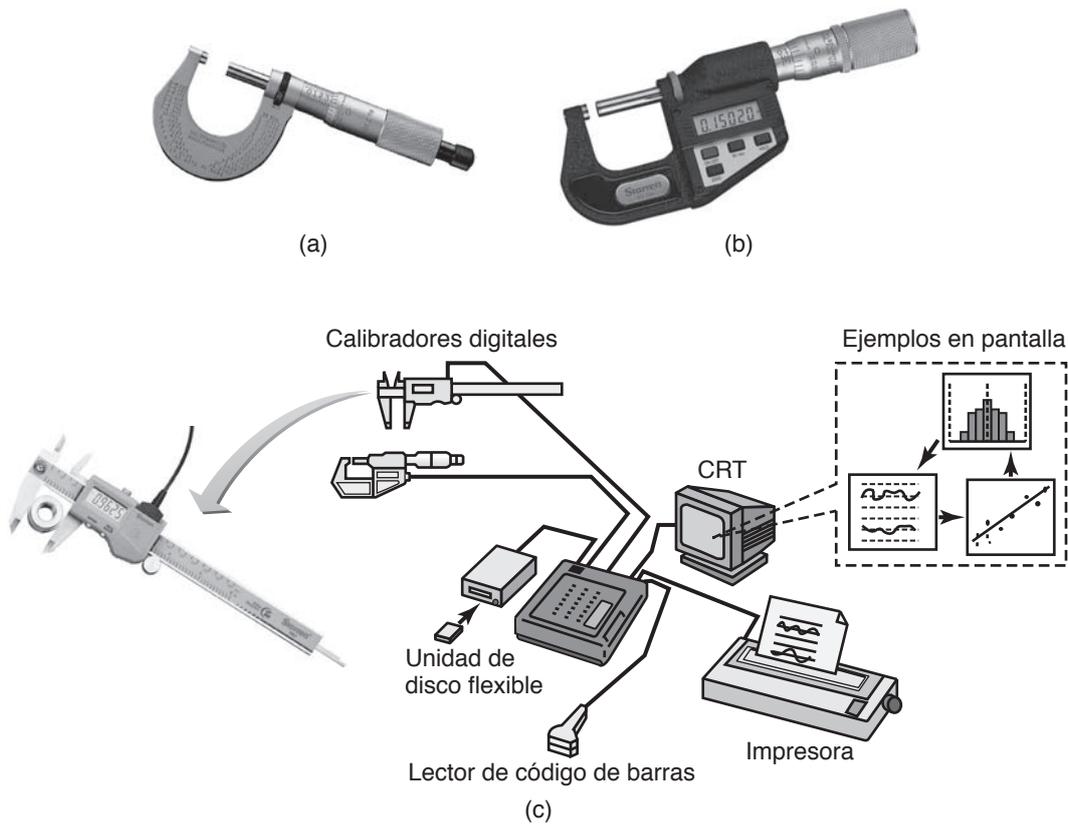


FIGURA 35.2 (a) Micrómetro vernier analógico. (b) Micrómetro digital, con rango de 0 a 1 pulg (0 a 25 mm) y resolución de $1.25 \mu\text{m}$ ($50 \mu\text{pulg}$); observe que es mucho más fácil y rápido medir dimensiones en este instrumento que en los micrómetros analógicos. (c) Ilustración esquemática que muestra la integración de calibradores digitales con microprocesadores para obtener datos en tiempo real para el control estadístico del proceso (vea la sección 36.8). *Fuente:* Cortesía de L. S. Starrett Co.

- **Calibradores variables:** también llamados *calibradores vernier* (en honor de P. Vernier, quien vivió en el siglo XVII), tienen una regla graduada y un graduador *deslizable*. En el presente, los *calibradores digitales* son de amplio uso.
- **Micrómetros:** es común usar estos instrumentos para medir el espesor y las dimensiones interiores o exteriores de las partes. Los *micrómetros digitales* están equipados con escalas (figura 35.2b) en unidades del sistema métrico o del inglés. También existen micrómetros para medir diámetros internos (*micrómetro de interiores*) y profundidades (*micrómetro de profundidad*, figura 35.3). Los topes o platinas de los micrómetros pueden estar equipados con contactos cónicos o esféricos para medir escalones, diámetros de roscas y espesores de la pared de tubos y láminas o placas curvadas.

Medición lineal (lectura indirecta). Es común que estos instrumentos sean calibradores y *compases*, sin escalas graduadas, y se usan para transferir la dimensión medida a un instrumen-



FIGURA 35.3 Micrómetro de profundidad, con escalas digital y de vernier. *Fuente:* Cortesía de L. S. Starrett Co.

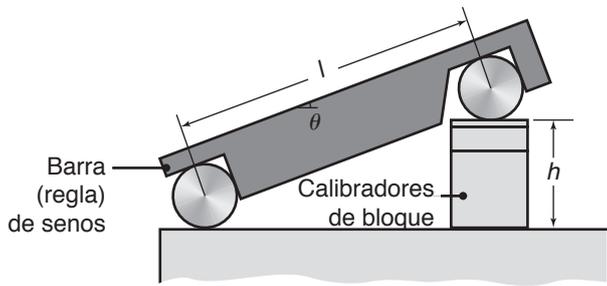


FIGURA 35.4 Ilustración esquemática de una barra (regla) de senos.

to de lectura directa, por ejemplo una regla. Debido a la experiencia que se requiere para usarlos y a que dependen de escalas graduadas, la exactitud de las herramientas de medición indirecta es limitada. Los *calibradores telescópicos* se usan para hacer mediciones indirectas de orificios o cavidades.

Medición de ángulos

- **Transportador ajustable:** éste es un instrumento de lectura directa, parecido a un transportador común, excepto que tiene un elemento móvil. Las dos hojas del transportador se ponen en contacto con la parte por medir y el ángulo se lee directamente en la escala vernier. Otro tipo común de transportador ajustable es

la *escuadra ajustable*, que es una regla de acero equipada con accesorios para medir ángulos de 45 y 90°.

- **Barra de senos:** consiste en una placa montada sobre dos cilindros sólidos (figura 35.4). Un cilindro es un pivote para la placa; el otro se localiza a una distancia fija del primero, comúnmente a 10 pulg. Al insertar calibradores de bloque (sección 35.4.4) bajo la segunda barra, el ángulo de la placa varía. La relación está dada por

$$\text{sen } \theta = \frac{h}{l} \tag{35.1}$$

- **Placas de superficie:** son placas que se usan para apoyar tanto la parte por medir como el instrumento de medición. Se fabrican para que sean muy planas, con variaciones tan pequeñas como de 0.25 μm en toda la placa. Es común que estén hechas de hierro fundido o piedras naturales, como granito. Las mesas de granito tienen las propiedades deseables de ser resistentes a la corrosión, no magnéticas y tienen poca expansión térmica, por lo que minimizan la distorsión por calor.

Medición longitudinal comparativa. Se utilizan instrumentos para medir longitudes en forma comparativa (también llamados instrumentos de *tipo de desviación*), que amplifican y miden las variaciones de la distancia entre dos o más superficies. Estos instrumentos, el ejemplo más común es el **micrómetro de carátula** (figura 35.5), comparan dimensiones, de ahí el término *comparativa*. El indicador se fija en cero con respecto a cierta superficie de referencia y el instrumento, o la superficie que se va a medir (ya sea externa o interna), se pone en contacto con el puntero. El movimiento del indicador se lee directamente en la carátula circular con exactitudes de hasta 1 μm (40 μpulg). También existen indicadores de carátula con mecanismos de amplificación eléctrica o de fluidos y con lecturas digitales.

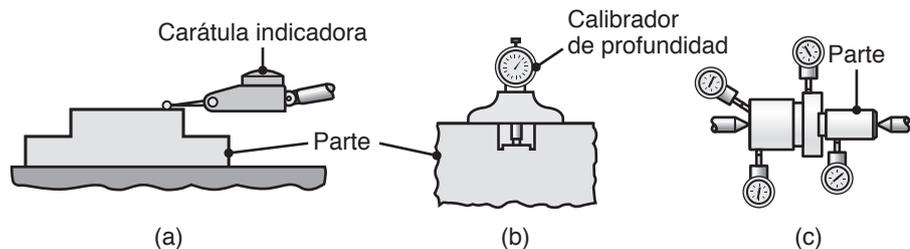


FIGURA 35.5 Tres usos de micrómetros de carátula para medir: (a) redondez y (b) profundidad, (c) para hacer mediciones múltiples de una parte.

35.4.2 Medición de características geométricas

Rectitud. La *rectitud* se comprueba con una escuadra o un micrómetro de carátula (figura 35.6). Se usa un *autocolimador*, que parece un telescopio con un rayo de luz que rebota desde el objeto, para medir con exactitud pequeñas desviaciones angulares sobre una superficie plana. Ahora los rayos láser tienen un amplio uso para alinear elementos de máquina individuales en el ensamble de elementos de maquinaria.

Planicidad. La *planicidad* se puede medir por medios mecánicos, con una *placa de superficies* y un *micrómetro de carátula*. Este método se utiliza para medir la perpendicularidad, que también puede medirse con escuadras de acero de precisión.

Otro método para medir la planicidad es la *interferometría*, que usa una *placa óptica*. Este dispositivo es un vidrio o disco de cuarzo fundido, con superficies planas paralelas, que se coloca sobre la superficie de la pieza de trabajo (figura 35.7a). Cuando se dirige un haz de luz *monocromática* (haz con una sola longitud de onda), la placa óptica divide la luz en dos haces que aparecen como bandas claras y como bandas oscuras (figura 35.7b).

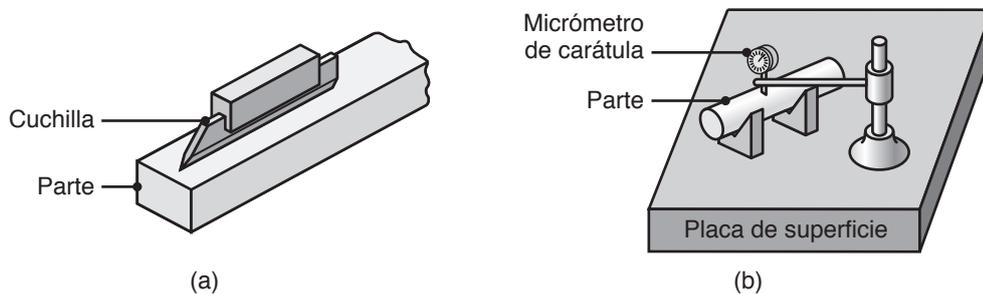


FIGURA 35.6 Medición manual de la rectitud, con (a) regla de cuchilla y (b) micrómetro de carátula. *Fuente:* Basado en F. T. Farago.

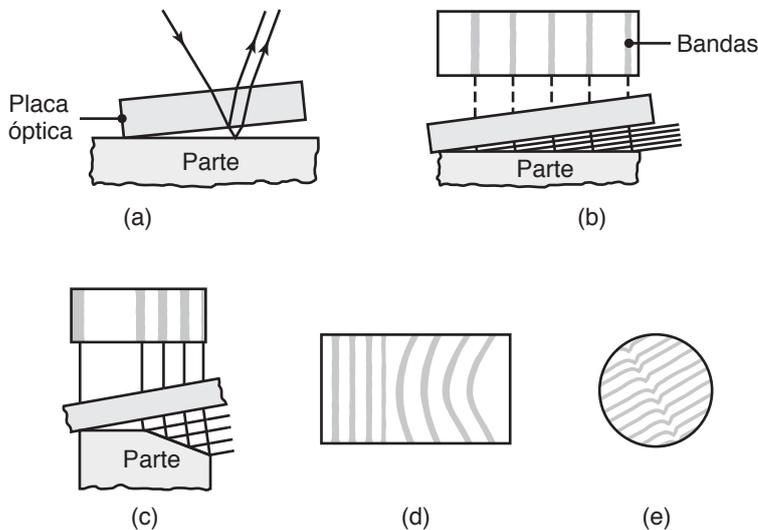


FIGURA 35.7 (a) Método de interferometría para medir planicidad con una placa óptica. (b) Bandas sobre una superficie plana e inclinada; una placa óptica que descansa sobre la superficie plana de una pieza de trabajo no dividirá el haz de luz y no habrá bandas. (c) Bandas sobre una superficie con dos inclinaciones; observe que cuanto mayor es la inclinación más juntas están las bandas. (d) Patrones de bandas curvadas, lo que indica curvatura de la superficie de la pieza de trabajo. (e) Patrón de bandas que indica un rayón en la superficie.

El número de bandas que aparecen se relaciona con la distancia entre la superficie de la parte y la superficie inferior de la placa óptica (figura 35.7c). Una superficie verdaderamente plana (es decir, una en la que el ángulo entre las dos superficies sea igual a cero) no dividirá el haz de luz, por lo que las bandas no aparecerán. Cuando las superficies no son planas, las bandas son curvadas (figura 35.7d). El método de interferometría también se utiliza para observar texturas y rayones en las superficies (figura 35.7e).

Las **rejillas de difracción** consisten en dos vidrios ópticos planos de diferentes longitudes con líneas paralelas muy cercanas entre sí grabadas en sus superficies. La rejilla sobre el vidrio más corto está ligeramente inclinada; como resultado, se desarrollan *bandas de interferencia* cuando se observa sobre el vidrio más largo. La posición de dichas bandas depende de la posición relativa de los dos conjuntos de vidrios. Con equipo moderno y el uso de contadores electrónicos y sensores fotoeléctricos puede obtenerse una resolución de $2.5 \mu\text{m}$ (0.0001 pulg) con rejillas que tienen 40 líneas/mm (1000 líneas/pulg).

Redondez. Esta característica se define como la desviación de la redondez pura (matemáticamente, un *círculo*). El término *fuera de redondez* (ovalamiento) es en realidad más descriptivo con la forma de la parte (figura 35.8a) que la palabra *redondez*. La redondez pura es esencial para el funcionamiento apropiado de ejes rotatorios, rodamientos, pistones, cilindros y baleros de los rodamientos.

Los métodos para medir la redondez caen por general en dos categorías:

1. La parte redonda se coloca en un *bloque en V* o entre los centros (figuras 35.8b y c, respectivamente) y se gira mientras el puntero de un micrómetro de carátula está en contacto continuo con la superficie de la parte. Después de una rotación completa de la pieza de trabajo se observa la diferencia entre las lecturas máxima y mínima en el indicador de carátula, lo que se llama **lectura total del indicador** (TIR, por sus siglas en inglés) o **movimiento completo del indicador**. Este método también se utiliza para medir la rectitud (en ángulo recto) de las caras de los extremos de los ejes que se maquinaron, como en la operación de refrentado que se ilustra en la figura 23.1e.
2. En el *trazo circular* la parte se coloca sobre una plataforma y su redondez se mide al rotar la plataforma (figura 35.8d); alternativamente, el puntero puede girarse alrededor de una parte estacionaria.

Perfil. El *perfil* se mide con medios como (a) comparar la superficie con una plantilla o calibrador de perfiles (como en la medición de radios y chaflanes) para verificar su conformidad, y (b) con el uso de diversos micrómetros de carátula o instrumentos similares. Sin embargo, el mejor método es el empleo de máquinas avanzadas de medición, descritas en la sección 35.5.

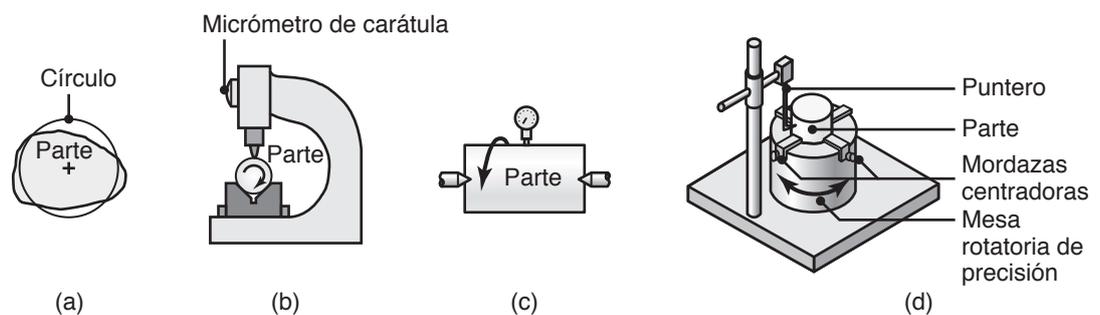


FIGURA 35.8 (a) Ilustración esquemática de una parte fuera de redondez (exagerada). Medición de la redondez con (b) un bloque en V y micrómetro de carátula; (c) una parte redonda apoyada sobre los centros y girada, (d) un trazo circular. Fuente: Basado en F. T. Farago.

Cuerdas de tornillos y dientes de engranes. Las cuerdas pueden medirse por medio de *calibradores de cuerdas* de diferentes diseños que comparan la cuerda producida contra una cuerda patrón. Algunos de los calibradores de uso común son los de *comparación de rosca*, de *paso de rosca*, micrómetros con punteros en forma de cono y *calibradores instantáneos* (vea la sección 35.4.4) con toques que tienen la forma de las cuerdas. Los dientes de los engranes se miden con (a) instrumentos similares a los micrómetros de carátula; (b) calibradores (figura 35.9a) y (c) micrómetros con pernos redondos o esferas de varios diámetros (figura 35.9b). Los métodos avanzados incluyen el uso de proyectores ópticos y máquinas de medición de coordenadas (figura 35.5).

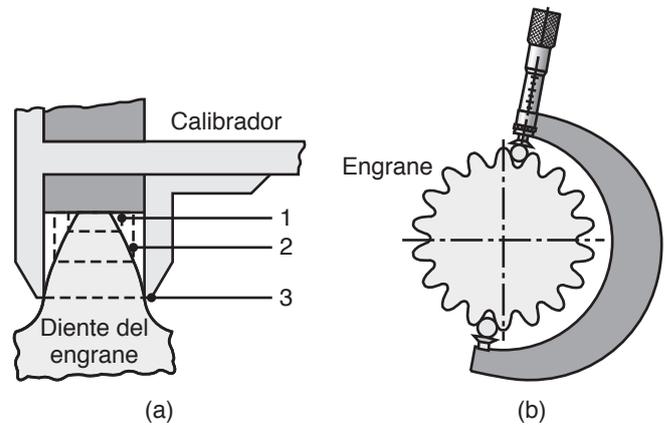


FIGURA 35.9 Medición del espesor de los dientes de un engrane, y del perfil, con (a) calibrador de dientes de engrane y (b) pernos o esferas y un micrómetro. Fuente: Cortesía de American Gear Manufacturers Association.

35.4.3 Proyectores ópticos de contornos

Estos instrumentos, también llamados **comparadores ópticos**, se desarrollaron por primera vez en la década de 1940 para verificar la geometría de las herramientas de corte para maquinarse roscas de tornillos, pero ahora se emplean para comprobar todos los perfiles (figura 35.10). La parte se monta sobre una mesa o entre los centros y se proyecta la imagen en una pantalla con aumento de 100× o más. Las mediciones lineales y angulares se efectúan directamente en la pantalla, la cual está marcada con líneas y círculos de referencia. Para hacer mediciones angulares la pantalla se gira.

35.4.4 Calibradores

Calibradores de bloque. Los *calibradores de bloque* son bloques individuales cuadrados, rectangulares o redondos de varios tamaños. Para el uso general están hechos de aleaciones de acero tratadas con calor y libres de esfuerzos. Los mejores calibradores de bloque están hechos de cerámica (con frecuencia, circonio) y carburo de cromo; a diferencia de los aceros, estos materiales no se corroen, pero son frágiles y deben manipularse con cuidado. Los *bloques de ángulo* se usan para hacer calibraciones angulares. Los calibradores de bloque tienen una planicidad dentro de un rango de 1.25 μm (50 μpulg). Cuando se emplean calibradores para hacer mediciones de alta precisión, es esencial el control de la temperatura ambiental.

Calibradores fijos. Estos calibradores son réplicas de las formas de las partes que se van a medir. Aunque los calibradores *fijos* son fáciles de usar y no son caros, sólo indican si la parte es demasiado pequeña o demasiado grande, en comparación con un patrón establecido. Se han vuelto menos comunes porque son incompatibles con los métodos de control de calidad (descritos en la sección 36.7). Entre los ejemplos de calibradores fijos están los siguientes:

- **Calibradores de tapón**, son de uso común para orificios (figuras 35.11a y b). El calibrador *PASA* (*GO*) es más pequeño que el calibrador *NO PASA* (o *NO GO*), y se desliza en cualquier orificio que tenga una dimensión más grande que el diámetro

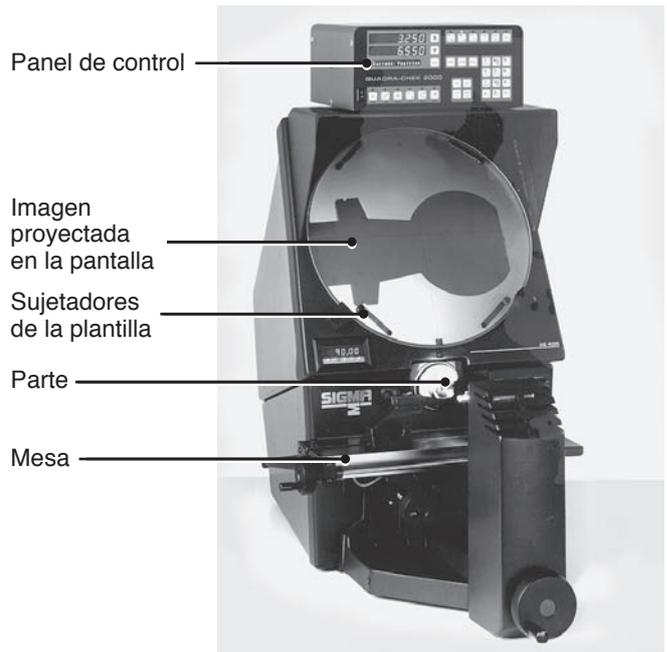


FIGURA 35.10 Proyector de contornos de rayo horizontal con pantalla de 16 pulgadas de diámetro e iluminación de tungsteno halógeno de 150 W. Fuente: Cortesía de L. S. Starrett Company, Precision Optical Division.

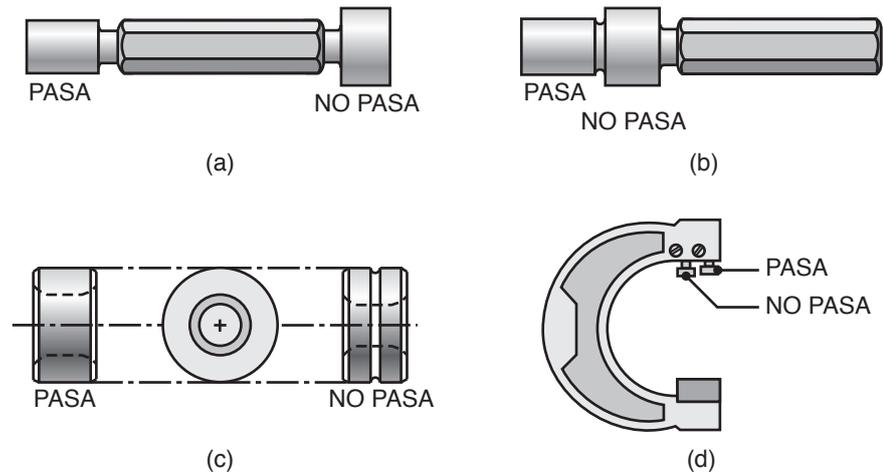


FIGURA 35.11 (a) Calibrador de tapón para barrenos, con las opciones *PASA* y *NO PASA* en los extremos opuestos del calibrador. (b) Calibrador de tapón con el *PASA* y el *NO PASA* en un extremo. (c) Calibradores de anillo plano para medir barras redondas. (d) Calibrador instantáneo con topes ajustables.

del calibrador. El calibrador *NO PASA* no debe entrar en el mismo orificio. Se requieren dos calibradores para hacer dichas mediciones, aunque ambos pueden estar en el mismo aparato, ya sea en los extremos opuestos o en dos segmentos en uno de ellos (*calibrador de tipo escalón*). También existen calibradores de tapón para medir ahusamientos, estrías y roscas internas (en los cuales el calibrador *PASA* debe atornillarse en el barreno roscado).

- **Calibradores de anillo** (figura 35.11c), se usan para medir ejes y partes redondas semejantes. Los calibradores para roscas de anillo se emplean para medir rocas externas.
- **Calibradores instantáneos** (figura 35.11d), se utilizan comúnmente para medir dimensiones externas. Están hechos con superficies calibradoras ajustables para su uso con partes que tienen diferentes dimensiones; una de las superficies ajustables se puede situar en un espacio diferente del otro, lo que convierte al equipo en un calibrador *PASA* y *NO PASA* de una sola pieza.

Calibradores neumáticos. En la figura 35.12a se ilustra la operación básica de un **calibrador neumático**, también llamado *calibrador de aire*. La cabeza del calibrador (llamada bayoneta de aire) tiene dos o más orificios, normalmente un diámetro de 1.25 mm (0.05 pulg) a través del cual escapa el aire presurizado (suministrado por una línea de presión constante). Cuanto más pequeño sea el espacio entre el calibrador y el orificio, más difícil es que el aire escape y mayor es la presión de retroceso. La presión de retroceso se indica en un medidor de presión y está calibrada para medir las variaciones en la dimensión de los orificios.

Los calibradores de aire se pueden girar durante el uso para que indiquen y midan cualquier falta de redondez de un orificio. Los diámetros exteriores de las partes (como pernos y ejes) también se miden cuando la bayoneta de aire tiene forma de anillo y se desliza sobre la parte. En los casos en que un anillo no es adecuado, puede usarse un calibrador con cabezal en forma de horquilla (con los orificios para el aire en las puntas, figura 35.12b). En la figura 35.12c se muestran varias formas de cabezales de aire, como el cónico, que pueden fabricarse para su uso en aplicaciones especializadas.

Los calibradores de aire son fáciles de usar y la resolución puede ser tan fina como $0.125 \mu\text{m}$ ($5 \mu\text{pulg}$); sin embargo, si la rugosidad de la superficie es demasiado grande, las lecturas podrían no ser confiables. Su naturaleza de falta de contacto y la baja presión tienen el beneficio de no distorsionar o dañar la parte medida, como podría ocurrir con los calibradores mecánicos.

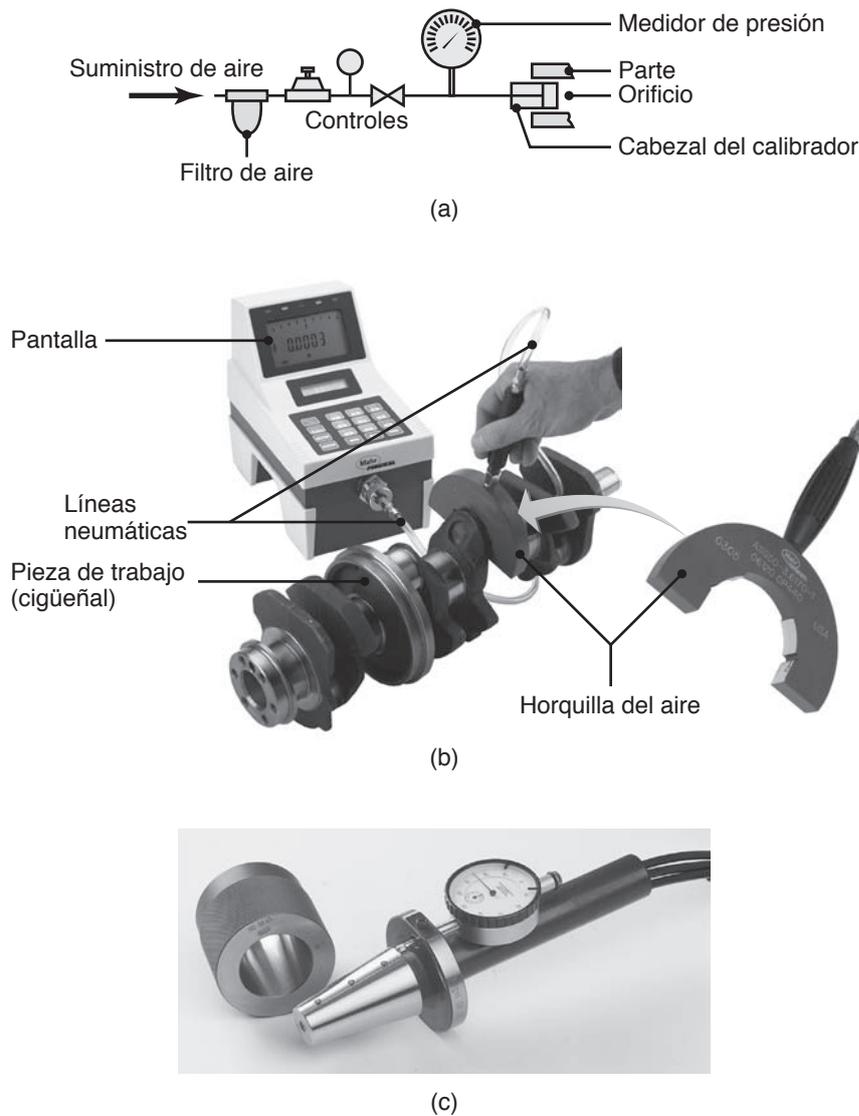


FIGURA 35.12 (a) Ilustración esquemática del principio de un calibrador de aire. (b) Ilustración de un sistema calibrador de aire al medir la dimensión principal de un rodamiento en un cigüeñal. (c) Cabezal cónico para la medición de aire; observe los tres pequeños orificios en la superficie cónica. Fuente: (b) Cortesía de Mahr Federal, Inc. (c) Cortesía de Stotz Gaging Co.

35.5 Instrumentos y máquinas modernos de medición

Se ha desarrollado una gran variedad de instrumentos y calibradores para hacer mediciones, que van desde equipos manuales sencillos hasta máquinas de control por computadora en espacios de trabajo muy grandes.

Calibradores electrónicos. A diferencia de los sistemas mecánicos, los *calibradores electrónicos* detectan el movimiento del puntero de contacto por medio de cambios de la resistencia eléctrica de una galga extensométrica, de inductancia o de capacitancia. Las señales eléctricas se convierten y muestran digitalmente como dimensiones lineales. En la figura 35.13 se muestra un calibrador electrónico manual para medir diámetros de perforación.



FIGURA 35.13 Calibrador electrónico para medir diámetros internos; el cabezal de medición está equipado con tres pernos de acero con punta de carburo para que tenga resistencia al desgaste. Fuente: Cortesía de TESA SA.



FIGURA 35.14 Instrumento electrónico para medir la longitud vertical, con resolución de $1 \mu\text{m}$ ($40 \mu\text{pulg}$). Fuente: Cortesía de TESA SA.

nes. Cuando se aprieta suavemente su maneral, la herramienta se inserta en la perforación y el diámetro de ésta se lee directamente. En la figura 35.14 se aprecia un calibrador electrónico asistido por microprocesador para medir la longitud vertical.

Un calibrador electrónico de uso común es el *transformador diferencial lineal variable* (LVDT, por sus siglas en inglés) para medir pequeños desplazamientos. El recubrimiento por deposición química de vapor (CVD; sección 34.6) de estos calibradores tiene una resistencia al desgaste superior a la de los bordes de acero y carburo de tungsteno; también resiste la corrosión. Aunque son más caros que los de otros tipos, los calibradores electrónicos tienen ventajas como la facilidad de operación, respuesta rápida, lecturas digitales, menor posibilidad de error humano, versatilidad, flexibilidad y la capacidad de integrarse en sistemas automatizados por medio de microprocesadores y computadoras.

Micrómetros láser. En este instrumento, un rayo láser barre la pieza de trabajo (figura 35.15), generalmente a razón de 350/s.

Los micrómetros láser son capaces de dar resoluciones tan grandes como de $0.125 \mu\text{m}$ ($5 \mu\text{pulg}$). Son apropiados no sólo para las partes estacionarias, sino también para hacer mediciones en línea de partes inmóviles, giratorias o con vibraciones, así como en partes en instalaciones de producción continua de alta velocidad. Más aún, debido a que no hay contacto físico, pueden medir las partes que estén a temperaturas elevadas o sean demasiado flexibles para medirse de otra forma. Los rayos láser son de varios tipos (como de barrido o rastreo de partes estacionarias) y generan descripciones con una **nube de puntos** de las superficies de las partes. En una *nube de puntos* se mide un gran número de puntos de la superficie y se guardan sus coordenadas; entonces a través de la interpolación entre los puntos se define una superficie. Los micrómetros láser son del tipo de sombra o son dispositivos de carga acoplada (CCD, por sus siglas en inglés) fijos para hacer mediciones en línea mientras la parte aún se encuentra en producción.

Interferometría láser. Esta técnica se utiliza para verificar y calibrar máquinas herramienta de varias características geométricas durante su ensamblado. El método tiene exactitudes mejores que las de los calibradores o indicadores. Los interferómetros láser también se usan para compensar de manera automática los errores de posición en máquinas de medición de coordenadas y de control numérico por computadora.

Medición digital fotoeléctrica de la longitud. Este tipo de medición se realiza por medio de un instrumento que mida las dimensiones generales, espesor y profundidad de las diferentes partes. La resolución va de 5 a $0.01 \mu\text{m}$.

35.5.1 Máquinas de medición por coordenadas

Como se muestra en forma esquemática en la figura 35.16a, una *máquina para medir coordenadas* (CMM, por sus siglas en inglés) consiste básicamente en una plataforma sobre la que se coloca la pieza de trabajo por medir y después se mueve linealmente o se gira. Se coloca un *puntero* (figura 35.16b; vea también la figura 25.6) a un cabezal capaz de realizar varios movimientos y registrar todas las mediciones. Además del puntero táctil que se muestra en la figura, hay otros tipos de punteros de barrido, láser (figura 35.16c) y de visión, todos los cuales son de carácter no táctil. En la figura 35.16d se muestra una CMM de una parte común.

Las máquinas para medir coordenadas son muy versátiles y capaces de registrar mediciones de perfiles complejos con gran resolución ($0.25 \mu\text{m}$; $10 \mu\text{pulg}$) y alta velocidad. Están construidas de manera rígida y robusta para que resistan los efectos del ambiente de las plantas de manufactura, como son las variaciones de temperatura y las vibraciones. Pueden colocarse cerca de las máquinas herramienta para hacer mediciones más eficien-

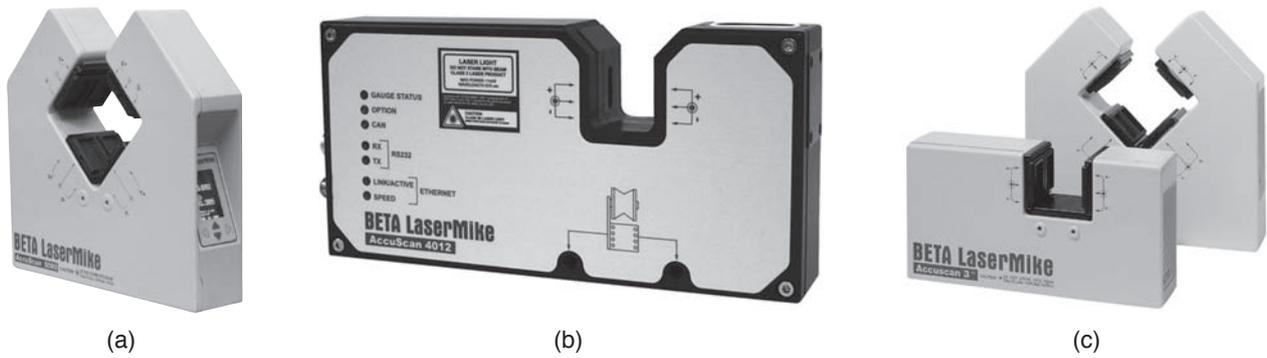
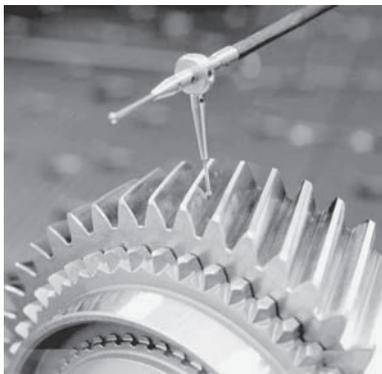
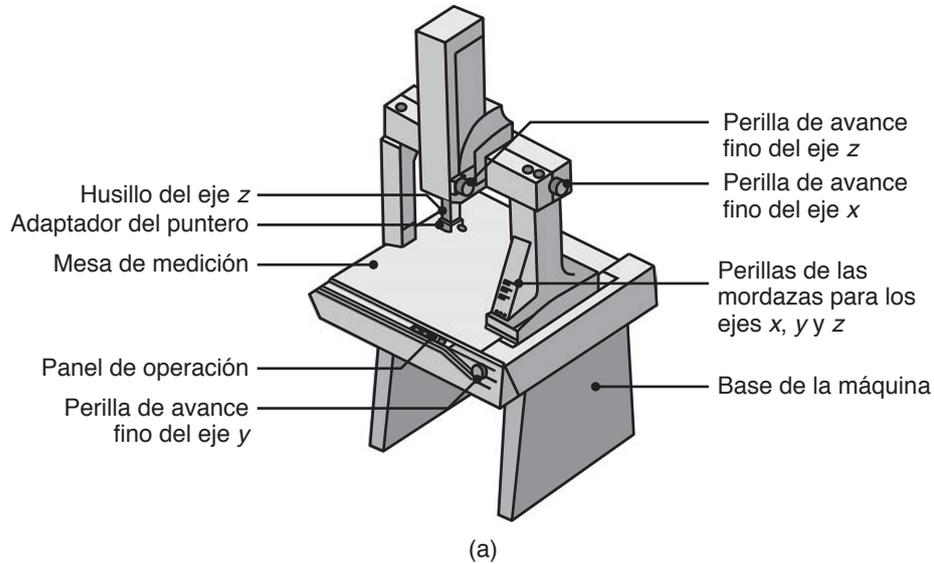


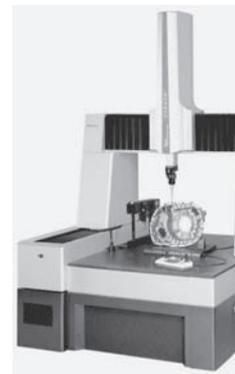
FIGURA 35.15 (a) y (b) Tipos de mediciones hechas con un micrómetro de barrido láser. (c) Dos tipos de micrómetros láser; observe que el instrumento del frente escudriña la parte (situada en la abertura) en una dimensión; el otro instrumento lo hace en dos dimensiones. *Fuente:* Cortesía de BETA LaserMike.



(b)



(c)



(d)

FIGURA 35.16 (a) Ilustración esquemática de una máquina de medición por coordenadas; (b) puntero de señales por contacto; (c) ejemplos de punteros láser; (d) máquina de medición por coordenadas, con una parte compleja que se va a medir. *Fuente:* (b) a (d) Cortesía de Mitutoyo America Corporation.

tes y tener una retroalimentación más rápida, de modo que los parámetros del procesamiento son corregidos antes de que se elabore la parte siguiente. Aunque las máquinas grandes son caras, la mayor parte de las que tienen puntero de contacto y movimiento tridimensional controlado por computadora son adecuadas para su uso en talleres pequeños y, por lo general, cuestan menos de \$20 000 dólares estadounidenses.

EJEMPLO 35.2 Máquina de medición por coordenadas para carrocerías de automóviles

En la figura 35.17 se muestra una máquina horizontal grande con control numérico computarizado de medición por coordenadas y que se utiliza para medir todas las dimensiones de una carrocería. Esta máquina tiene un rango de medición para tamaños de $6\text{ m} \times 1.6\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ (236 pulg \times 63 pulg \times 94 pulg), una resolución de $0.1\ \mu\text{m}$ ($4\ \mu\text{pulg}$) y una velocidad de medición de 5 mm/s (0.2 pulg/s). El sistema tiene una compensación de temperatura dentro de un rango de $16\text{ a }26\text{ }^\circ\text{C}$ ($60\text{ a }78\text{ }^\circ\text{F}$) para mantener una buena exactitud de las medidas.

Para hacer mediciones eficientes la máquina tiene dos cabezales, con punteros operados con gatillos y

controlados de manera simultánea, con movimientos en tres dimensiones. Los punteros están controlados por un software y la máquina está equipada con dispositivos de seguridad para impedir que golpeen inadvertidamente alguna parte de la carrocería durante sus movimientos. El equipo, que se muestra alrededor de la base de la máquina, incluye hardware y software de apoyo que controla todos los movimientos y registra todas las mediciones.

Fuente: Cortesía de Mitutoyo America Corporation.



FIGURA 35.17 Máquina grande de medición por coordenadas con dos cabezales que miden varias dimensiones de la carrocería de un automóvil.

35.6 Medición automatizada

La *medición automatizada* se basa en varios **sistemas de sensores en línea** que monitorean continuamente las dimensiones de las partes mientras se elaboran y, de ser necesario, usan dichas mediciones como datos de entrada para hacer ajustes (vea también las secciones 36.12 y 37.7). Las celdas de manufactura y los sistemas de manufactura flexible (vea el capítulo 39) han llevado a la adopción de técnicas y sistemas avanzados de medición.

Para apreciar la importancia de la vigilancia en línea de las dimensiones, considere el lector lo siguiente: si una máquina herramienta ha estado produciendo cierta parte con dimensiones aceptables, ¿qué factores contribuyen a la desviación subsecuente en las dimensiones de la misma parte producida por la misma máquina? Hay varios factores técnicos, así como humanos, involucrados:

- *Variaciones* en las propiedades y dimensiones del material de entrada.
- *Distorsión* de la máquina debido a efectos térmicos causados por factores como cambios de la temperatura ambiental, deterioro de los fluidos para el trabajo de metales y cambios en los rodamientos de la máquina herramienta, así como de otros de sus componentes.
- *Desgaste* de las herramientas, dados y moldes.
- *Errores humanos*.

Las dimensiones de las partes variarán debido a uno o más de estos factores, por lo que se hace necesaria la vigilancia continua durante la producción.

35.7 Características generales y selección de los instrumentos de medición

Las características y calidad de los instrumentos de medición se describen por lo general con varios términos específicos, definidos como sigue (en orden alfabético):

- **Exactitud:** grado de coincidencia de la dimensión medida con su dimensión real.
- **Amplificación**, también llamada **magnificación:** razón de la salida del instrumento a la dimensión de entrada.
- **Calibración:** ajuste o preparación de un instrumento para que dé lecturas exactas contra un patrón de referencia.
- **Desajuste**, también llamado **estabilidad:** capacidad de un instrumento para mantener su calibración durante el tiempo.
- **Linealidad:** exactitud de las lecturas de un instrumento a lo largo de todo su rango de medición.
- **Precisión:** grado en que un instrumento repite la medición del mismo patrón.
- **Exactitud repetida:** lo mismo que la exactitud, pero repetida varias veces.
- **Resolución:** dimensión más pequeña que se puede leer en un instrumento.
- **Regla del 10** (*regla del fabricante del calibrador*): un instrumento o calibrador debe ser 10 veces más exacto que las tolerancias dimensionales de la parte que se mide; un factor de 4 se conoce como la *regla normal de mil* (milésimos de pulgada).
- **Sensibilidad:** diferencia más pequeña en la dimensión que un instrumento puede distinguir o detectar.
- **Velocidad de respuesta:** rapidez con que un instrumento indica una medición, en particular cuando se mide un número de partes en rápida sucesión.

La selección de un instrumento de medición apropiado para una aplicación particular también depende de (a) el tamaño y tipo de partes que se van a medir, (b) factores del ambiente, como temperatura, humedad y polvo, (c) habilidad requerida del operador y (d) costo del equipo.

35.8 Dimensionamiento geométrico y tolerancias

Las partes manufacturadas individualmente se ensamblan en productos. Con frecuencia se da por hecho que cuando, por ejemplo, se manufacturan y ensamblan mil podadoras de pasto, cada parte de las podadoras ajustará en forma apropiada con sus componentes. Del mismo modo, cuando se reemplaza un remache roto de una máquina antigua, se compra otro idéntico.

Esto se hace con confianza porque el remache se manufactura de acuerdo con ciertos estándares y especificaciones, por lo que las dimensiones de todos los remaches similares variarán sólo en una cantidad pequeña y especificada llamada *tolerancia*, que no afectará su funcionamiento. En otras palabras, todos los remaches similares son **intercambiables**.

Tolerancia dimensional. La *tolerancia dimensional*, del latín *tolerare*, que significa “durar para siempre”, se define como la variación permisible o aceptable de dimensiones como altura, ancho, profundidad, diámetro y ángulos de una parte. Las tolerancias son inevitables porque es virtualmente imposible e innecesario manufacturar dos partes que tengan precisamente las mismas dimensiones.

Además, debido a que las tolerancias dimensionales exigentes incrementan en forma significativa el costo del producto (vea la figura 40.4), no es deseable con respecto a la rentabilidad un rango de tolerancia innecesariamente estrecho. Sin embargo, para muchas partes, las tolerancias estrictas *son* necesarias para el funcionamiento adecuado; algunos ejemplos son los instrumentos de mediciones de precisión, pistones hidráulicos, baleros con elementos giratorios y álabes de turbinas para motores de aviación.

La medición rápida y confiable de las dimensiones y características de las partes puede ser una tarea difícil. Por ejemplo, cada una de los 6 millones de partes de un avión Boeing 747-400 requiere la medición de alrededor de 25 características, lo que representa hacer 150 millones de mediciones. Encuestas muestran que las tolerancias dimensionales de las partes más recientes manufacturadas se están contrayendo en un factor de 3 cada 10 años, y que esta tendencia continuará (vea también la figura 25.16). Se estima que las exactitudes de

- Las máquinas convencionales de torneado y fresado (capítulos 23 y 24) aumentarán del actual 2 a $0.5 \mu\text{m}$.
- Las máquinas de piedra de diamante para elaborar obleas para la fabricación de semiconductores (vea la figura 28.6d, en el sitio web del libro) bajarán hasta $0.25 \mu\text{m}$.
- Las máquinas de precisión de torneado de diamante (sección 25.7) serán de 0.03 a $0.01 \mu\text{m}$.
- Las máquinas de haz de iones de ultraprecisión (sección 28.7, en el sitio web del libro) serán hasta menos que $0.001 \mu\text{m}$.

Importancia del control de la tolerancia. Las superficies libres y que no tienen una función no necesitan tener un control estricto de su tolerancia; las tolerancias dimensionales son importantes sólo cuando va a ensamblarse una parte con otra. Por ejemplo, la exactitud de unos barrenos y su distancia entre centros para una barra conectora (figura 14.8a) es mucho más crítica que el ancho y espesor de la barra en varios sitios a lo largo de su longitud.

Para reconocer la importancia de las tolerancias dimensionales, considere el ensamble de una flecha simple (un eje) y una rueda con un barreno circular. Suponga que el diámetro del eje es de 1 pulg (figura 35.18). La rueda es un fundido que tiene un agujero de

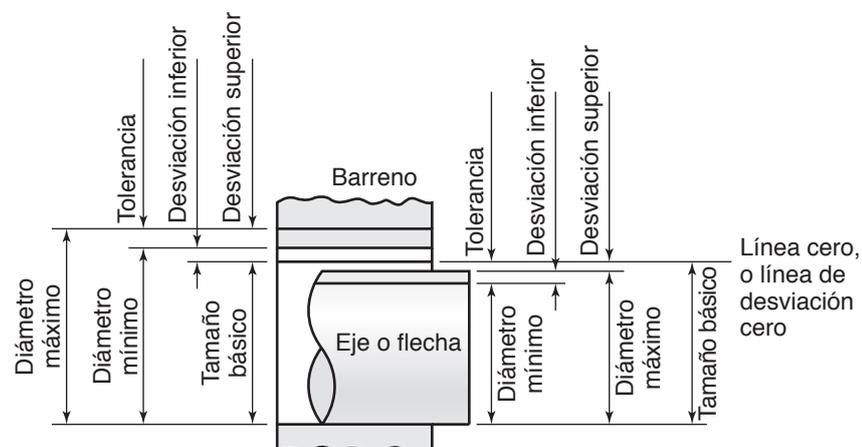


FIGURA 35.18 Tamaño básico, desviación y tolerancia básicos de un eje, de acuerdo con el sistema ISO.

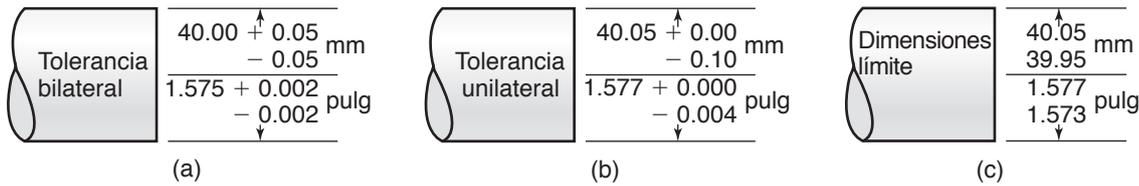


FIGURA 35.19 Varios métodos para asignar tolerancias en un eje: (a) tolerancia bilateral, (b) tolerancia unilateral y (c) dimensiones límite.

1 pulg de diámetro maquinado en ella. ¿El eje ajustará en el barreno sin tener que forzarlo o quedará flojo en la perforación? La dimensión de 1 pulg es el **tamaño nominal** del eje. Si producimos otro en un momento diferente o lo seleccionamos al azar de un lote, es probable que tenga un diámetro ligeramente distinto (vea también el capítulo 36). Máquinas con la misma preparación producirán cilindros de diámetros un poco diferentes, lo que depende de varios factores como velocidad de operación, temperatura, lubricación y variaciones de las propiedades del material de entrada.

Con el paso de los años se ha establecido cierta terminología para definir con claridad estas cantidades geométricas. Uno de esos sistemas es el de la International Organization for Standardization (ISO), que se muestra en la figura 35.18. Observe que tanto el eje como la perforación tienen diámetros mínimo y máximo y que la diferencia es la tolerancia para cada miembro. Un plano apropiado de ingeniería especificaría estos parámetros con valores numéricos, como se ilustra en la figura 35.19.

El rango de tolerancias dimensionales asequibles en los procesos de manufactura se proporciona en varias figuras y tablas de este libro. Hay una relación general entre las tolerancias y el tamaño de la parte (figura 35.20) y entre las tolerancias y el acabado de la

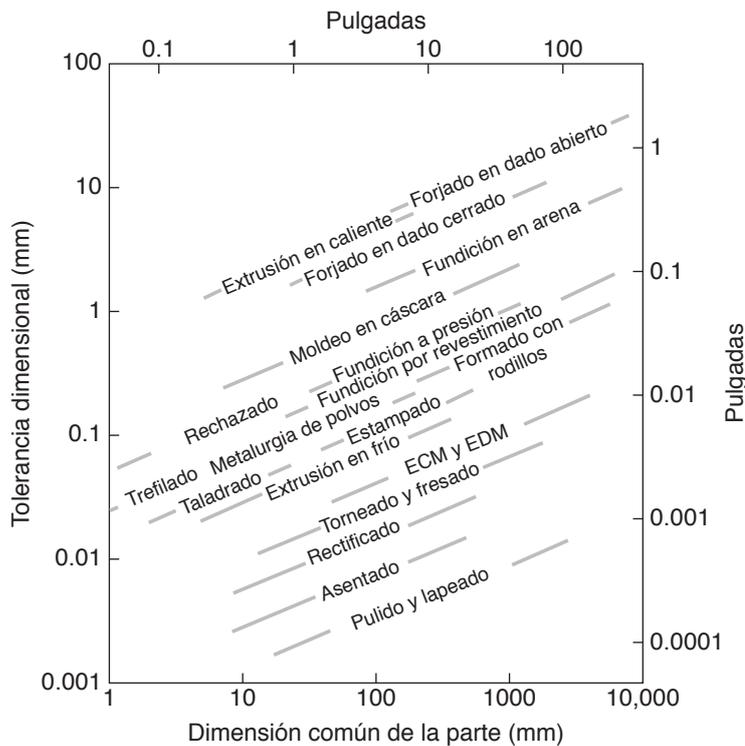


FIGURA 35.20 Tolerancias dimensionales como función del tamaño de la parte para distintos procesos de manufactura; observe que debido a los muchos factores involucrados hay un amplio rango para las tolerancias.

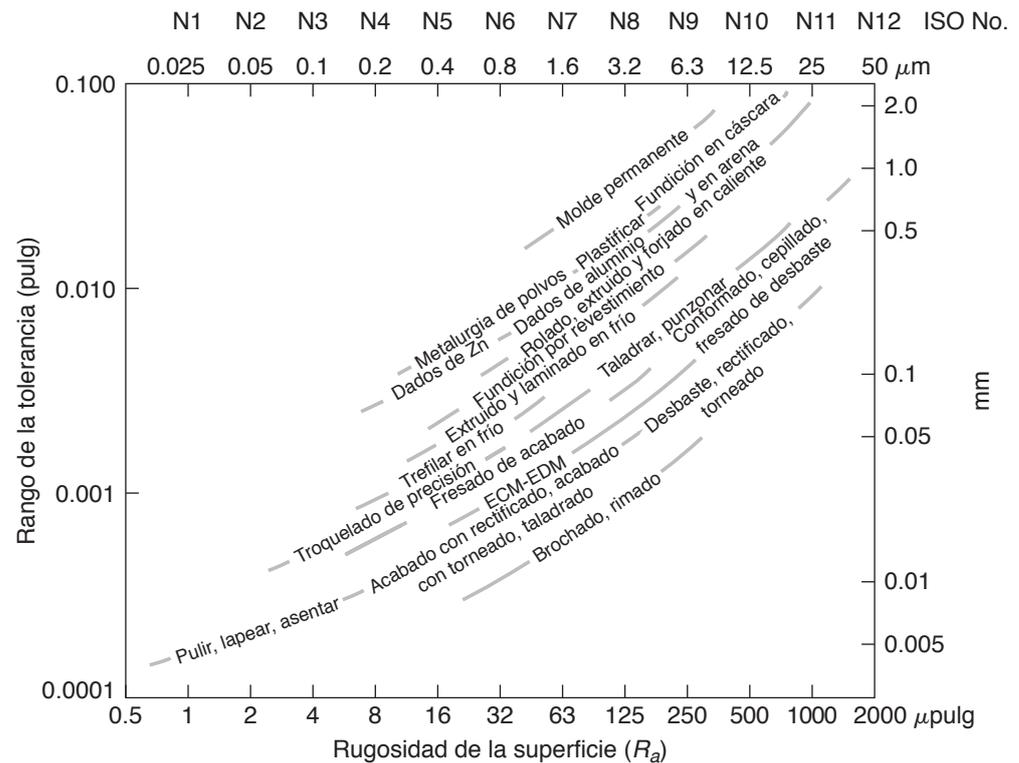


FIGURA 35.21 Rango de tolerancia dimensional y rugosidad de la superficie obtenida con varios procesos de manufactura; estas tolerancias se aplican a una dimensión de 25 mm (1 pulgada) de la pieza de trabajo. *Fuente:* Basado en J. A. Schey.

superficie de las partes manufacturadas con distintos procesos (figura 35.21). Observe el amplio rango de tolerancias y acabados de superficie que se obtienen y que, cuanto más grande sea la parte, mayor es el rango de tolerancia asequible.

Definiciones. Se usan varios términos para describir las características de las relaciones dimensionales entre partes que embonan. Los detalles de las definiciones se encuentran en los estándares ANSI/ASME B4.2, ANSI/ASME Y14.5 e ISO/TC10/SC5. A continuación se definen brevemente los términos de uso común para características geométricas (en orden alfabético):

- **Ajuste:** rango de holgura o interferencia que resulta de la aplicación de una combinación específica de tolerancia de ajuste y tolerancia en el diseño de las propiedades de las partes que embonan.
- **Ajuste de holgura:** ajuste que permite rotación o deslizamiento entre partes que embonan.
- **Ajuste de interferencia:** ajuste que tiene límites de tamaño, prescrito de modo que siempre hay una interferencia cuando se ensamblan partes compatibles.
- **Ajuste de transición:** ajuste con poco claro o interferencia que permite la ubicación exacta de las partes que embonan.
- **Condición máxima de material:** aquella en la que una propiedad de cierto tamaño contiene la máxima cantidad de material dentro de los límites establecidos para dicho tamaño.
- **Dimensión límite, también llamada límites:** dimensiones máxima y mínima de una parte.

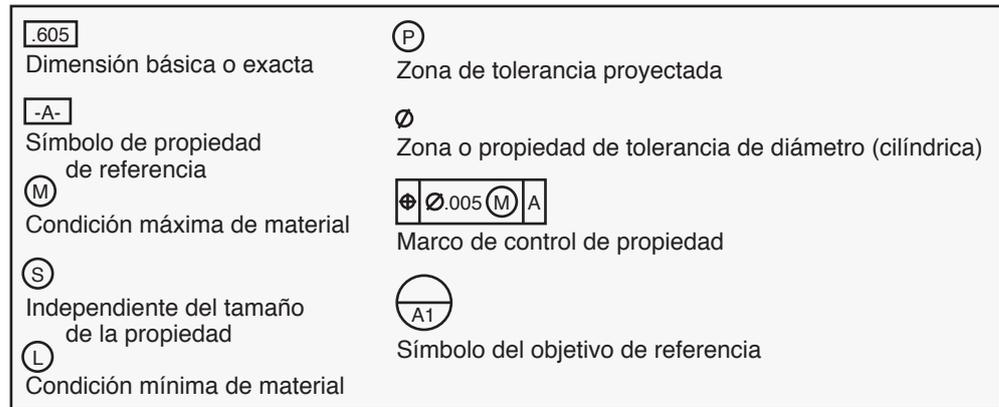
- **Holgura:** espacio entre las partes que embonan.
- **Interferencia:** holgura negativa.
- **Línea cero:** línea de referencia junto con el tamaño básico del que se especifica un rango de tolerancias y desviaciones.
- **Propiedad:** porción físicamente identificable de una parte, como un barreno, ranura, perno o chaflán.
- **Referencia (Datum):** eje, punto, línea o plano, teóricos y exactos.
- **Sistema basado en orificio,** también llamado **práctica del orificio patrón** o **sistema del orificio básico;** tolerancias con base en una línea cero en el orificio.
- **Sistema con base en un eje,** también llamado **práctica del eje patrón** o **sistema del eje básico;** tolerancias basadas en una línea cero sobre el eje.
- **Tamaño básico:** dimensión de la que se derivan los límites de tamaño, con el uso de tolerancias y tolerancias de ajuste.
- **Tamaño nominal:** dimensión aproximada que se usa con fines de identificación general.
- **Tolerancia bilateral:** desviación (más o menos) del tamaño básico.
- **Tolerancia de ajuste,** también llamada **dimensión funcional** o **dimensión de suma:** es la diferencia especificada de las dimensiones entre partes que embonan.
- **Tolerancia internacional (IT,** por sus siglas en inglés): grupo de tolerancias que varían con el tamaño básico de la parte, pero proveen el mismo nivel de exactitud relativa dentro de cierto grado.
- **Tolerancia posicional:** sistema para especificar la posición, tamaño y forma real de los rasgos de una parte, inclusive las variaciones en la tolerancia de ajuste.

Tipo de rasgo	Tipo de tolerancia	Característica	Símbolo
Individual (sin referencia)	Forma	Planicidad	
		Rectitud	
		Circularidad (redondez)	
		Cilindricidad	
Individual o relacionada	Perfil	Perfil de una línea	
		Perfil de una superficie	
Relacionado (requiere de referencia)	Orientación	Perpendicularidad	
		Angularidad	
		Paralelismo	
	Ubicación	Posición	
		Concentricidad	
		Excentricidad	
		Excentricidad total	

(a)

FIGURA 35.22 Símbolos geométricos característicos que se han de indicar en los planos de ingeniería de las partes que se van a manufacturar. *Fuente:* Cortesía de The American Society of Mechanical Engineers.

(continúa)



(b)

FIGURA 35.22 (continúa)

TABLA 35.1

Clases de ajuste			
Clase	Descripción	Tipo	Aplicaciones
1	Flojo	Holgura	Donde no es esencial la exactitud, como en el equipo de construcción y minería.
2	Libre	Holgura	En elementos rotatorios con velocidades de 600 rpm o más, como en motores y ciertas partes automotrices.
3	Medio	Holgura	En elementos rotatorios con velocidades por debajo de 600 rpm, como en máquinas herramienta de precisión y partes automotrices precisas.
4	Ajustado	Holgura	Donde es permisible un claro pequeño y donde no se busca que las partes que embonan se muevan con libertad en condiciones de carga.
5	Ceñido	Interferencia	Donde es necesario dar golpes ligeros con un martillo para ensamblar las partes.
6	Apretado	Interferencia	En ensambles semipermanentes apropiados para un ajuste apretado o por contracción en secciones ligeras.
7	Medio	Interferencia	Donde se requiere una presión considerable para ensamblar y para ajustes por contracción de secciones medianas; apropiado para ajustes por presión en armaduras de generadores y motores y para ruedas de automóviles.
8	Fuerza pesada o contracción	Interferencia	Donde se necesita una sujeción considerable entre superficies, como en las ruedas de locomotoras y en discos de cigüeñales pesados de grandes motores.

TABLA 35.2

Tolerancias recomendadas en mm para las clases de ajuste				
Clase	Tolerancia de ajuste	Interferencia	Tolerancia del mamelón	Tolerancia del eje
1	$0.0073d^{2/3}$	—	$0.0216d^{1/3}$	$0.0216d^{1/3}$
2	$0.0041d^{2/3}$	—	$0.0112d^{1/3}$	$0.0112d^{1/3}$
3	$0.0026d^{2/3}$	—	$0.0069d^{1/3}$	$0.0069d^{1/3}$
4	0.000	—	$0.0052d^{1/3}$	$0.0035d^{1/3}$
5	—	0.000	$0.0052d^{1/3}$	$0.0035d^{1/3}$
6	—	$0.00025d$	$0.0052d^{1/3}$	$0.0052d^{1/3}$
7	—	$0.0005d$	$0.0052d^{1/3}$	$0.0052d^{1/3}$
8	—	$0.0010d$	$0.0052d^{1/3}$	$0.0052d^{1/3}$

- **Tolerancia unilateral:** desviación de la dimensión nominal, sólo en una dirección.
- **Tolerancias geométricas:** tolerancias que involucran propiedades de la forma de la parte.

Debido a que las dimensiones de los orificios son más difíciles de controlar que las de los ejes, lo común es utilizar el sistema con base en orificios para especificar las tolerancias en ensambles de ejes y orificios. En la figura 35.22a y b se muestran los símbolos usados para indicar características geométricas.

Límites y ajustes. Los *límites* y *ajustes* son esenciales para especificar las dimensiones de orificios y ejes (vea las tablas 35.1 y 35.2). Hay dos estándares para ellos, según lo describe el American National Standards Institute (vea ANSI/ASME B4.1, B4.2 y B4.3). Un estándar se basa en la unidad tradicional de la pulgada; el otro se basa en el sistema métrico y ha sido desarrollado con mucho detalle.

RESUMEN

- La tecnología moderna de manufactura requiere instrumentos para medir con varios rasgos y características.
- Existen varios equipos para hacer mediciones, desde sencillos calibradores de bloque hasta calibradores electrónicos de gran resolución. Se han hecho grandes avances en la medición automatizada, con la conexión de dispositivos en microprocesadores y computadoras para tener un control exacto durante el proceso de las operaciones de manufactura.
- Factores importantes son la vinculación, el monitoreo, despliegue, distribución y manipulación confiable de datos, así como los costos significativos involucrados en su implementación.
- Las tolerancias dimensionales y su selección son factores importantes en la manufactura. Cuanto más pequeño sea el rango de las tolerancias especificadas, mayor será el costo de producción; entonces, las tolerancias deben ser lo más amplias posible pero al mismo tiempo deben cumplir con los requerimientos funcionales del producto.

TÉRMINOS CLAVE

Ajustes	Calibradores de bloque	Lectura total de indicador	Proyector óptico de contornos
Autocolimador	Calibradores electrónicos	Límites	Rejillas de difracción
Calibrador de aire	Indicador de carátula	Máquina de medición por coordenadas	Resolución
Calibrador de anillo	Instrumentos analógicos	Micrómetro	Sensibilidad
Calibrador de tapón	Instrumentos de medición comparativa de longitud	Micrómetro láser	Tolerancia dimensional
Calibrador fijo	Instrumentos digitales	Patrones de medición	Transportador ajustable
Calibrador instantáneo	Interferometría	Placa óptica	
Calibrador neumático		Precisión	
Calibrador vernier			

BIBLIOGRAFÍA

- Bentley, J. P., *Principles of Measurement Systems*, 4a. ed., Prentice Hall, 2005.
- Bucher, J. L. (ed.), *The Metrology Handbook*, American Society for Quality, 2004.
- Cogorno, G., *Geometric Dimensioning and Tolerancing for Mechanical Design*, 2a. ed., McGraw-Hill, 2011.
- Curtis, M. A., *Handbook of Dimensional Measurement*, 4a. ed., Industrial Press, 2007.
- Hocken, R. J. y Pereira, P. H., *Coordinate Measuring Machines and Systems*, 2a. ed., CRC Press, 2011.
- Krulikowski, A., *Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing*, 3a. ed., Delmar, 2012.

Madsen, D. A., *Geometric Dimensioning and Tolerancing*, 7a. ed., Goodheart-Wilcox, 2003.
 Meadows, J. D., *Geometric Dimensioning and Tolerancing Handbook*, ASME, 2009.

Whitehouse, D. J., *Handbook of Surface and Nanometrology*, 2a. ed., CRC Press, 2010.

PREGUNTAS DE REPASO

- 35.1 ¿Qué es metrología?
- 35.2 Explique cómo se define y mide un metro.
- 35.3 Explique lo que significa patrones de medición.
- 35.4 ¿Cuál es la diferencia básica entre las mediciones de lectura lineal directa e indirecta? Mencione los instrumentos que se usan en cada categoría.
- 35.5 ¿Qué quiere decir medición comparativa de la longitud?
- 35.6 Explique cómo se mide la planicidad. ¿Qué es una placa óptica?
- 35.7 Describa el principio de un comparador óptico.
- 35.8 ¿Por qué las máquinas de medición por coordenadas se han convertido en importantes instrumentos de medición?
- 35.9 ¿Cuál es la diferencia entre un calibrador de tapón y uno de anillo?

- 35.10 ¿Qué son las tolerancias dimensionales? ¿Por qué es importante su control?
- 35.11 ¿Por qué la barra de senos recibe ese nombre?
- 35.12 Explique la diferencia entre tolerancia y tolerancia de ajuste.
- 35.13 ¿Cuál es la diferencia entre la tolerancia bilateral y la unilateral?
- 35.14 ¿Cómo se mide la rectitud?
- 35.15 ¿Cuándo es deseable un ajuste de holgura? ¿Un ajuste de interferencia?
- 35.16 ¿Qué factores contribuyen a las desviaciones de las dimensiones del mismo tipo de partes fabricadas en la misma máquina?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 35.17 ¿Por qué es incorrecto el intercambio de las palabras “exactitud” y “precisión” que ocurre con frecuencia?
- 35.18 Revise los siguientes resultados de una competencia de tiro con arco. Indique cuáles de los objetivos corresponden a un arquero con (a) colocación precisa de las flechas; (b) colocación exacta de las flechas.

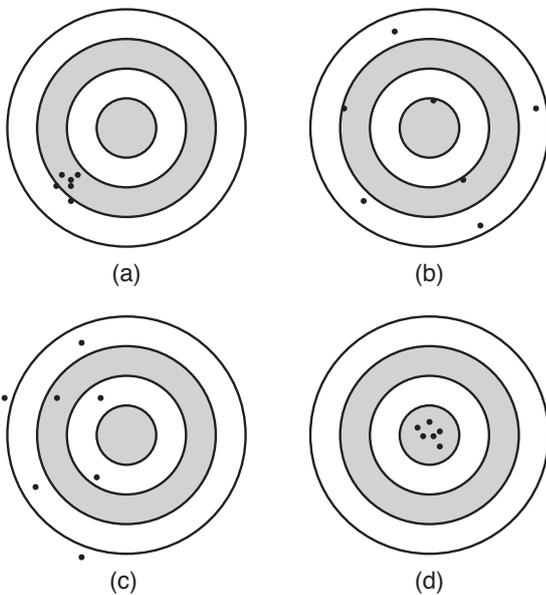


FIGURA P35.18

- 35.19 ¿Por qué los procesos de manufactura producen partes con un amplio rango de tolerancias? Explique y dé varios ejemplos.

- 35.20 Explique la necesidad de la inspección automática.
- 35.21 Las tolerancias dimensionales para las partes no metálicas por lo general son más amplias que para las metálicas. Explique por qué. ¿Sería lo mismo también para las partes de cerámicos?
- 35.22 Comente sus observaciones sobre la figura 35.21. ¿Por qué aumenta la tolerancia dimensional con la mayor rugosidad de la superficie?
- 35.23 Revise la figura 35.20 y haga comentarios acerca del rango de tolerancias y de las dimensiones de la parte producidas por varios procesos de manufactura.
- 35.24 En el juego de dardos qué es mejor, ¿ser exacto o ser preciso? Explique.
- 35.25 ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de los calibradores PASA (GO) y NO PASA (NO GO)?
- 35.26 Comente sus observaciones acerca de la figura 35.19.
- 35.27 ¿Qué son los calibradores de bloque? Explique tres métodos con los que se pueden usar los calibradores de bloque en metrología.
- 35.28 ¿Por qué es importante controlar la temperatura durante la medición de las dimensiones? Explíquelo con ejemplos.
- 35.29 Describa las características de los calibradores electrónicos.
- 35.30 ¿Qué método usaría para medir el espesor de una parte de hule esponjoso? Explique.
- 35.31 Revise la figura 35.20 y explique por qué se relaciona la tolerancia dimensional con las dimensiones de la parte.
- 35.32 Revise la figura 35.21 y dé razones por las que hay un rango de tolerancia y rugosidad de la superficie para cada proceso de manufactura.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

35.33 Suponga que una regla de acero se expande 0.07% debido al aumento de la temperatura del ambiente. ¿Cuál sería el diámetro indicado de un eje cuyo diámetro es de 1.200 pulg a temperatura ambiente?

35.34 Si se usara la misma regla de acero del problema 35.33 para medir extrusiones de aluminio. ¿Cuál sería el diámetro indicado a temperatura ambiente? ¿Cuál sería si la parte estuviera hecha de un termoplástico?

35.35 Un eje debe satisfacer un requerimiento de diseño de tener al menos 1.10 pulg de diámetro, pero puede excederse en 0.015 pulg. Exprese la tolerancia del eje como se indicaría en un plano de ingeniería.

35.36 Revise la tabla 35.2 y haga la gráfica de la tolerancia de un mamelón y el eje en que se monta como función del diámetro.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

35.37 Describa sus reflexiones sobre los méritos y limitaciones del equipo de medición digital sobre los instrumentos analógicos. Dé ejemplos específicos.

35.38 Tome un micrómetro de vernier común (vea la figura 35.2a) y una barra cilíndrica sencilla. Pida a cinco de sus compañeros que midan el diámetro de la barra con dicho micrómetro. Comente sus observaciones.

35.39 Obtenga un micrómetro digital y una bola de acero de, digamos, $\frac{1}{4}$ pulg de diámetro. Mida el diámetro de la bola cuando (a) haya sido puesta en un congelador; (b) haya sido colocada en agua hirviendo y (c) usted la haya sostenido entre sus manos durante diversos periodos. Escriba las variaciones, si las hubiera, de las dimensiones medidas y haga comentarios al respecto.

35.40 Repita el problema 35.39 pero con las partes siguientes: (a) manija de plástico de una jarra pequeña; (b) parte plástica termofija como el maneral o manija de un recipiente para salsa; (c) un vaso pequeño de vidrio y (d) un borrador común de caucho.

35.41 ¿Cuál es el significado de las pruebas descritas en los problemas 35.39 y 35.40?

35.42 Explique las ventajas y limitaciones relativas de un puntero de contacto comparado con un puntero láser.

35.43 Haga dibujos sencillos de algunas máquinas herramienta para formar y cortar (como se describen en las partes III y IV

del libro) e intégreelas con los distintos tipos de equipo de medición descritos en este capítulo. Comente las posibles dificultades que habría para lograr la integración.

35.44 Inspeccione varias partes y componentes de productos para el consumidor y haga comentarios acerca de qué tan estrictas deben ser las tolerancias dimensionales para que dichos productos funcionen adecuadamente.

35.45 Como usted sabe, las partes de láminas muy delgadas de metal se distorsionan de manera diferente cuando se sujetan desde ubicaciones y bordes diferentes de la parte, igual que ocurre con una hoja de papel o aluminio delgado. Entonces, ¿cómo podría usarse una máquina de medición por coordenadas para que tomara medidas “exactas”? Explique.

35.46 Explique cómo se justificaría el costo tan considerable de una máquina de medición por coordenadas como la que aparece en la figura 35.17.

35.47 Explique cómo se medirían las dimensiones de una sección transversal hexagonal extruida y cómo se indicaría la desviación con respecto a la forma de un hexágono.

35.48 Haga una investigación en internet y elabore una lista de los métodos que usaría para medir la longitud como una función de la longitud (por ejemplo, algunos milímetros comparados con un kilómetro).

35.49 ¿Cómo se miden las dimensiones de los dispositivos MEMS?

36

Aseguramiento,
prueba e inspección
de la calidad

36.1	Introducción	1030
36.2	Calidad del producto	1031
36.3	Aseguramiento de la calidad	1031
36.4	Administración total de la calidad	1032
36.5	Métodos Taguchi	1034
36.6	Los estándares ISO y QS	1038
36.7	Métodos estadísticos de control de calidad	1039
36.8	Control estadístico del proceso	1042
36.9	Confiabilidad de los productos y procesos	1048
36.10	Pruebas no destructivas	1048
36.11	Pruebas destructivas	1052
36.12	Inspección automatizada	1052

EJEMPLOS:

36.1	Producción de tubos de polímero	1036
36.2	Incrementar la calidad sin aumentar el costo del producto	1037
36.3	Cálculo de los límites del control y de la desviación estándar	1046

CASO DE ESTUDIO:

36.1	Manufactura de equipos de televisión por Sony Corporation	1036
------	---	------

- Este capítulo describe los procedimientos utilizados para asegurar la manufactura de productos de alta calidad. Describe las herramientas matemáticas y técnicas de inspección que se han desarrollado para producir artículos de alta calidad, inclusive la administración de la calidad total, los métodos Taguchi y los métodos de Deming y de Juran.
- Después se describen los métodos estadísticos de control de calidad y de las gráficas de control, inclusive el muestreo de aceptación, con el fin de asegurar que la producción cumpla con los estándares de calidad.
- El capítulo concluye con el análisis de los métodos empleados en las pruebas destructiva y no destructiva de materiales y productos.

36.1 Introducción

Los productos manufacturados desarrollan ciertas características externas e internas que en parte son resultado del tipo de procesos de producción empleados. Las características externas más comunes involucran consideraciones acerca de las dimensiones, el tamaño y acabado e integridad de la superficie. Las características internas incluyen defectos como porosidad, impurezas, inclusiones, transformaciones de fase, esfuerzos residuales, fragilidad, grietas y el desprendimiento de las laminaciones en materiales compósitos.

Algunos de estos defectos pueden estar en el material en bruto (materia prima), mientras que otros son introducidos o inducidos durante la operación particular de manufactura. Antes de ser comercializados, las partes y productos manufacturados se inspeccionan con objeto de:

- Asegurar la exactitud dimensional, de modo que las partes ajusten en forma apropiada dentro de otros componentes durante el ensamblado; recuerde que un avión Boeing 747-400 tiene seis millones de partes que se deben ensamblar.
- Identificar productos cuya falla o mal funcionamiento pueden tener implicaciones serias, como lesiones corporales o incluso la muerte. Ejemplos comunes son los cables de elevador, interruptores, frenos, piedras de esmeril, ruedas de trenes, uniones soldadas, álabes de turbina y recipientes a presión.

La **calidad del producto** siempre ha sido uno de los aspectos más importantes de las operaciones de manufactura. En vista del mercado global tan competitivo, la *mejora continua de la calidad* es una prioridad; en Japón, el término **kaizen** se utiliza para denotar *mejora continua que nunca termina*. La *calidad debe construirse dentro del producto* y no considerarse solamente *después* de haberlo fabricado. Por tanto son vitales la coope-

ración y comunicación estrecha entre los ingenieros de diseño y los de manufactura, así como el involucramiento y audacia de la dirección de la compañía.

Durante los últimos años se han hecho grandes avances en la ingeniería de la calidad y la productividad, debido en gran parte a los esfuerzos de expertos en calidad como W. E. Deming, G. Taguchi y J. M. Juran. En el presente se reconoce a nivel internacional la importancia de la *calidad, confiabilidad y seguridad* de los productos en una economía global, como lo evidencia el establecimiento de varios estándares ISO y QSO y, a nivel de Estados Unidos, el Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige.

36.2 Calidad del producto

¿Qué es calidad? A diferencia de la mayoría de los términos más técnicos, es difícil definir con precisión la calidad; generalmente se define como lo *apropiado del producto para el uso*. Así, la calidad es una característica o propiedad de base amplia y sus factores consisten no sólo en consideraciones técnicas bien definidas sino también en opiniones subjetivas. Varios aspectos de la calidad que por lo general se identifican son: desempeño, durabilidad, confiabilidad, robustez, disponibilidad, costo y servicio, así como la estética y la calidad percibida.

Por ejemplo, considere lo siguiente: (a) el asa de un utensilio de cocina no está bien instalada o se decolora o agrieta durante el uso normal; (b) una báscula funciona erráticamente; (c) una aspiradora requiere reparaciones frecuentes y (d) una máquina herramienta no puede mantener las tolerancias dimensionales especificadas debido a la falta de rigidez o a su mala construcción. Estos ejemplos indican que el producto es de baja calidad. Por tanto, la percepción general es que un artículo de alta calidad es el que ejecuta sus funciones de manera confiable durante un largo tiempo, sin que falle o requiera reparaciones (vea la tabla 1.4 en la introducción general). El nivel de calidad que un fabricante elige para sus productos depende del mercado en el cual pretende introducirlos; por ejemplo, las herramientas de baja calidad y poco costo tienen su propio nicho de mercado.

Al contrario de la percepción del público general, los productos de alta calidad no necesariamente cuestan más, en especial si se considera el hecho de que los productos de mala calidad

- Tienen problemas de ensamble y mantenimiento de sus componentes.
- Requieren reparaciones en campo (vea la tabla I.5).
- Tienen incluido el alto costo de la insatisfacción del cliente (vea la sección 36.5).

Como se describe en la sección 40.9, el costo total del producto depende de algunas variables, entre ellas el nivel de automatización de la planta de manufactura. Hay muchas formas de que los ingenieros revisen y modifiquen el diseño y los procesos de manufactura en su conjunto para minimizar el costo del producto sin afectar su calidad. Entonces, los estándares de calidad son esencialmente un balance entre varias consideraciones; este balance también recibe el nombre de **retorno económico de la calidad** (ROQ, por sus siglas en inglés), y por lo general incluye algunos límites en la vida esperada del producto.

36.3 Aseguramiento de la calidad

El *aseguramiento de la calidad* es el esfuerzo total que realiza un fabricante para garantizar que sus productos cumplen con un conjunto detallado de especificaciones y estándares. Se puede definir como todas las acciones necesarias para asegurar que se satisfarán los requerimientos de calidad. El **control de calidad** es el conjunto de técnicas operativas usadas para cumplir con los requerimientos de calidad.

Los estándares cubren varios tipos de parámetros, como dimensiones, acabado superficial, tolerancias, composición y color, así como las propiedades y características mecánicas, físicas y químicas. Además, los estándares se suelen escribir para garantizar un

ensamble apropiado, usando *componentes intercambiables* y libres de defectos, lo que da como resultado un producto que funciona como lo pretendían sus diseñadores.

Un aspecto importante del aseguramiento de la calidad es la capacidad de *analizar* los defectos a medida que ocurren en la línea de producción y *eliminarlos con rapidez* o reducirlos a niveles aceptables. En un sentido más general, el aseguramiento de la calidad implica la *evaluación* del producto y la satisfacción del cliente. La suma de todas estas actividades es lo que se describe como **control de calidad total** y **administración total de la calidad**.

Con el fin de controlar la calidad, es esencial ser capaces de:

- *Medir* cuantitativamente el nivel de calidad.
- *Identificar* todas las variables del material y del proceso que pueden controlarse.

El nivel de calidad logrado durante la producción se puede comprobar por medio de la inspección *continua* del producto con el fin de determinar si cumple las especificaciones relevantes para las tolerancias dimensionales, el acabado de la superficie, los defectos y otras características más.

36.4 Administración total de la calidad

La *administración total de la calidad* (TQM, por sus siglas en inglés) es un *método de sistemas* en el que tanto la dirección como los empleados realizan un esfuerzo concertado para manufacturar de manera consistente productos de alta calidad; la meta principal es la *prevención de defectos*, en lugar de la *detección de defectos*.

En la organización, el *liderazgo* y el *trabajo en equipo* son esenciales para asegurar que la meta de la **mejora continua** en las operaciones de manufactura sea de primera importancia, ya que *reducen la variabilidad del producto* y mejoran la satisfacción del cliente. El concepto de TQM también requiere el *control del proceso* y no el *control de las partes producidas*, de modo que la variabilidad pueda reducirse y no se permita que las partes defectuosas sigan su camino por la línea de producción.

Círculo de calidad. Establecidos por primera vez en Japón en 1962, los *círculos de calidad* consisten en grupos de empleados (trabajadores, supervisores y directivos) que se reúnen regularmente de manera voluntaria para analizar cómo mejorar y mantener la calidad del producto en *todas* las etapas de la operación de manufactura. Se hace énfasis en el compromiso, la responsabilidad y creatividad del trabajador, así como en el trabajo en equipo. Se proporciona *capacitación* exhaustiva de modo que el trabajador pueda tomar conciencia de la calidad y también sea capaz de analizar datos estadísticos con el fin de identificar las causas de la mala calidad y emprenda acciones inmediatas para corregir la situación. La experiencia indica que los círculos de calidad son más eficaces en ambientes de *manufactura esbelta*, descrita en la sección 39.6.

Ingeniería de la calidad como filosofía. Los expertos en control de calidad han colocado muchos de los conceptos y métodos del control de calidad en una perspectiva más amplia. Entre estos expertos destacan Deming, Juran y Taguchi, cuyas filosofías de la calidad y el costo del producto han tenido, y tienen, gran influencia en la manufactura moderna.

36.4.1 Métodos Deming

Durante la Segunda Guerra Mundial, el estadístico estadounidense W. E. Deming (1900-1993) y otros más desarrollaron nuevos métodos de *control estadístico del proceso* para las plantas industriales en tiempos de guerra. Los métodos surgieron al reconocer que

TABLA 36.1**Los 14 puntos de Deming**

1. Crear constancia en el propósito de mejorar el producto y el servicio.
2. Adoptar la nueva filosofía: rechazar la aceptación de defectos.
3. Dejar de depender de la inspección en masa para lograr la calidad.
4. Acabar con la práctica de hacer negocios con base en la etiqueta del precio.
5. Mejorar el sistema de producción y servicio constantemente y para siempre, con el fin de mejorar la calidad y productividad, y así disminuir el costo de manera sostenida.
6. Dar capacitación institucional para cumplir los requerimientos de una tarea en particular y documentar los requerimientos para la capacitación futura.
7. Instituir el liderazgo, en oposición a la supervisión.
8. Desterrar el miedo para que cada quien trabaje con eficacia.
9. Eliminar las barreras entre departamentos.
10. Eliminar las frases, exhortaciones y metas de cero defectos y nuevos niveles de productividad.
11. Eliminar las cuotas y la administración por números o metas numéricas. Sustituirlas con liderazgo.
12. Eliminar los obstáculos que privan al trabajador del orgullo de su labor.
13. Instituir un programa vigoroso de educación y mejora personal.
14. Hacer que cada persona de la compañía trabaje para lograr la transformación.

había *variaciones* (a) en el desempeño de las máquinas y las personas y (b) en la calidad y las dimensiones de las materias primas (inventario). Los esfuerzos de estos pioneros no sólo involucraban métodos de análisis estadístico, sino también una nueva manera de ver las operaciones de manufactura desde el punto de vista de *mejorar la calidad y reducir los costos*.

Deming reconocía que las organizaciones de manufactura son *sistemas* de administración, trabajadores, máquinas y productos. Hacía mucho énfasis en la comunicación, el compromiso directo del trabajador y la educación en estadística y tecnología de manufactura moderna. Sus ideas fundamentales se resumen en los célebres *14 puntos*, que aparecen en la tabla 36.1. Estos puntos no se deben ver como una lista de cotejo o un menú de tareas; son lo que Deming definía como *características de las compañías* que producen artículos de alta calidad.

36.4.2 Métodos de Juran

Un contemporáneo de Deming, J. M. Juran (1904-2008), ingeniero eléctrico y consultor en administración, hacía énfasis en la importancia de

- Reconocer la calidad en todos los niveles de la organización, inclusive en la alta dirección.
- Desarrollar en la corporación una cultura receptiva.
- Capacitar a todo el personal en planeación, control y mejora de la calidad.

La principal preocupación de la alta dirección de una organización es el negocio y la administración, en tanto que la de los implicados en el control de calidad es la tecnología. Estos mundos diferentes con frecuencia tenían en el pasado diferentes intereses y sus conflictos provocaban problemas de calidad. Los planificadores determinan quiénes son los clientes y sus necesidades. Los clientes de una organización pueden ser externos (usuarios finales que compran el producto o servicio) o internos (partes diferentes de una organización que dependen de otros segmentos de ésta para recibir productos y servicios). Entonces, los planificadores desarrollan productos y diseñan el proceso para que responda a las necesidades del consumidor. Los planes se pasan a quienes están a cargo de las operaciones, quienes se convierten en los responsables de implementar tanto el control de calidad como su mejora continua.

36.5 Métodos Taguchi

G. Taguchi (1924-2012), ingeniero y estadístico, propuso elevar la calidad y disminuir los costos al combinar técnicas de ingeniería y estadística para optimizar el diseño del producto y los procesos de manufactura. Ahora la expresión *métodos Taguchi* se refiere a los métodos que desarrolló para manufacturar productos de alta calidad. Un punto de vista fundamental que antecede a todo es el reto de la calidad que enfrentan los fabricantes: proporcionar productos que gusten a los consumidores, y para ello los fabricantes deben ofrecer artículos con las siguientes características:

- Mucha confiabilidad.
- Desarrollan bien las funciones que se desean.
- Buena apariencia.
- Baratos.
- Pueden actualizarse.
- Disponibles en la cantidad requerida cuando se necesitan.
- Robustos durante su ciclo de vida (vea la sección 36.5.1).

Obviamente, estas características son las metas de los fabricantes que luchan por proveer artículos de alta calidad. Aunque en realidad es muy difícil alcanzar dichas características, es innegable que la excelencia en la manufactura es un prerrequisito.

Taguchi también contribuyó a los métodos que se usan para documentar la calidad, con el reconocimiento de que cualquier desviación del estado óptimo de un producto representa una pérdida financiera debido a factores como reducción de la vida del producto, en el desempeño y en la economía. La *pérdida de calidad* la definía como una *pérdida financiera* para la sociedad una vez lanzado el producto. La pérdida de calidad ocasiona los problemas siguientes:

- La mala calidad lleva a la insatisfacción del cliente.
- Se incurre en costos por dar mantenimiento y reparar los productos defectuosos, en especial cuando las reparaciones tienen que hacerse en campo.
- Disminuye en el mercado la credibilidad del fabricante.
- A fin de cuentas, el fabricante pierde su participación en el mercado.

Los métodos Taguchi de la **ingeniería de la calidad** hacen énfasis en la importancia de

- **Mejorar la interacción de equipos de funciones cruzadas:** los ingenieros de diseño y los de manufactura se comunican entre sí con un lenguaje común. Ellos cuantifican las relaciones entre los requerimientos del diseño y la selección del proceso de manufactura.
- **Implementar el diseño experimental:** se estudian simultáneamente los factores implicados en un proceso u operación y sus interacciones.

Los efectos de las variables controlables y las incontrolables sobre el producto se identifican mediante el *diseño de experimentos*. Este método minimiza las variaciones en las dimensiones y propiedades del producto y, en última instancia, llevan la media al nivel deseado. Los métodos usados para el diseño de experimentos son complejos e implican el uso de *diseño factorial* y *arreglos ortogonales*, herramientas que reducen el número de experimentos requeridos. Estos métodos también son capaces de identificar los efectos de las variables que no se pueden controlar (llamadas ruido), como cambios en las condiciones ambientales de la planta.

El uso de diseño factorial y arreglos ortogonales da como resultado (a) la *identificación* rápida de las variables controlables, conocida como *observación de los efectos principales*, y (b) la capacidad de determinar el mejor método de control del proceso. El control de estas variables en ocasiones requiere adquirir equipo nuevo o hacer modifi-

caciones grandes en el ya existente. Entonces, por ejemplo, es posible identificar rápidamente las variables que afectan las tolerancias dimensionales al maquinar un componente particular y especificar, siempre que sea posible, que sean correctos la velocidad de corte, el avance, la herramienta cortadora y los fluidos de corte.

36.5.1 Robustez

Otro aspecto de la calidad, propuesto en primer lugar por Taguchi, es la *robustez*: un diseño, proceso o sistema robusto es el que continúa en funcionamiento, dentro de parámetros aceptables, a pesar de las variaciones (con frecuencia imprevistas) en su ambiente. En otras palabras, su rendimiento (como su desempeño) tiene una *sensibilidad mínima* a las variaciones de sus entradas (como los cambios en el ambiente, la carga y la fuente de energía).

En un diseño robusto, por ejemplo, un elemento funcionará suficientemente bien aun si las cargas aplicadas, o sus direcciones, exceden los valores previstos. Del mismo modo, una máquina o sistema robusto sufrirá un deterioro mínimo en su desempeño aun si experimenta variaciones en las condiciones ambientales, como la temperatura, humedad, calidad del aire y vibraciones. Una máquina robusta tampoco tendrá una reducción significativa en su rendimiento durante su vida útil, en tanto que un diseño menos robusto se desempeñará con menos eficiencia conforme pase el tiempo.

Como ilustración sencilla de un diseño robusto, considere una placa de lámina metálica que se va a montar en una pared con dos tornillos (figura 36.1a). El posicionamiento de los dos barrenos para montar la placa tendrá cierto error debido al proceso de manufactura implicado; este error impedirá que el borde superior de la placa quede perfectamente horizontal.

En la figura 36.1b se muestra un diseño más robusto, en el cual los barrenos se han separado lo doble que en el diseño original. Aun cuando la precisión de la ubicación de los barrenos es la misma, y el costo de manufactura también es el mismo, la variabilidad en el borde superior de la placa (con respecto de la horizontal) ahora se ha reducido a la mitad. Si la placa se sujeta a vibración, los tornillos podrían aflojarse con el tiempo. Incluso un método de diseño más robusto sería usar un adhesivo para mantener las cuerdas del tornillo en su lugar, o usar un tipo diferente de sujetador que no se aflojara con el paso del tiempo (vea también la sección 32.5).

36.5.2 Función pérdida de Taguchi

Presentada a principios de la década de 1980, la *función pérdida de Taguchi* es una herramienta para comparar la calidad con base en la minimización de las variaciones. Calcula la pérdida creciente para la compañía cuando el componente se desvía del objetivo del diseño. Esta función se define como una parábola en la que un punto es el costo del reemplazo (incluyendo envío, desperdicios y costos de manejo) en un extremo de las

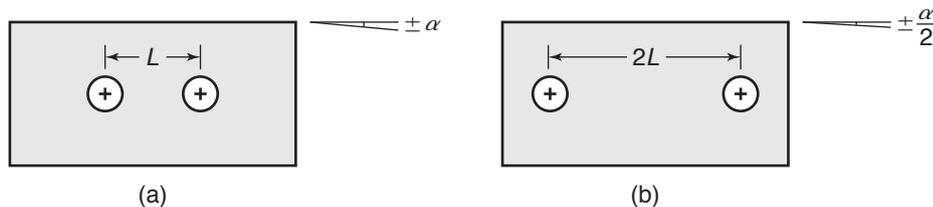


FIGURA 36.1 Ejemplo sencillo de diseño robusto. (a) Ubicación de dos barrenos para montar una placa de lámina metálica, donde la desviación de la superficie superior con respecto a estar perfectamente horizontal es $\pm\alpha$. (b) Nuevas ubicaciones de los dos barrenos; la desviación de la superficie superior de la placa con respecto a estar perfectamente horizontal ahora se redujo a $\pm\alpha/2$.

tolerancias, mientras un segundo punto corresponde a la pérdida igual a cero en el objetivo del diseño.

Matemáticamente, el costo de pérdida se puede escribir como:

$$\text{Costo de pérdida} = k[(Y - T)^2 + \sigma^2], \tag{36.1}$$

donde Y es la media del valor de manufactura, T es el valor objetivo del diseño, σ es la desviación estándar de las partes manufacturadas (vea la sección 36.7) y k es una constante definida como

$$k = \frac{\text{Costo de reemplazo}}{(\text{LSL} - T)^2}, \tag{36-2}$$

donde LSL es el límite inferior de la especificación. Cuando los límites de especificación inferior (LSL, por sus siglas en inglés) y superior (USL, por sus siglas en inglés) están a la misma distancia de la media (es decir, las tolerancias están balanceadas, se puede usar cualquiera de los límites en esta ecuación.

EJEMPLO 36.1 Producción de tubos de polímero

Dado: Se producen tubos de polímero de alta calidad para aplicaciones médicas en los cuales el objetivo del espesor de la pared es de 2.6 mm, con un LSL de 3.2 mm y USL de 2.0 mm (2.6 ± 0.6 mm). Si las unidades tienen defectos, se reemplazan con un costo de \$10.00 dólares estadounidenses que incluye el envío. El proceso actual produce partes con una media de 2.6 mm y desviación estándar de 0.2 mm. El volumen actual es de 10 000 secciones de tubo por mes. Se estudia una mejora para el sistema de calentamiento del extrusor. Esta mejora reducirá la variación a la mitad pero cuesta \$50 000.

Se solicita: Determinar la función pérdida de Taguchi y el periodo de recuperación de la inversión.

Respuesta: Las cantidades involucradas son: USL = 3.2 mm, LSL = 2.0 mm, $T = 2.6$ mm, $\sigma = 0.2$ mm y $Y = 2.6$ mm:

La cantidad k está dada por la ecuación (36.2) como

$$k = \frac{\$10.00}{(3.2 - 2.6)^2} = \$27.28.$$

Según la ecuación (36.1), el costo de pérdida antes de la mejora es

$$\begin{aligned} \text{Costo de pérdida} &= (27.78)[(2.6 - 2.6)^2 + 0.2^2] \\ &= \$1.11 \text{ por unidad.} \end{aligned}$$

Después de la mejora, la desviación estándar es 0.1 mm; por lo tanto, el costo de pérdida es

$$\begin{aligned} \text{Costo de pérdida} &= (27.78)[(2.6 - 2.6)^2 + 0.1^2] \\ &= \$0.28 \text{ por unidad.} \end{aligned}$$

Entonces, los ahorros son $(\$1.11 - \$0.28)(10\,000) = \$8300$ por mes. Por consiguiente, el periodo de recuperación de la inversión es $\$50\,000 / (\$8300/\text{mes}) = 6.02$ meses.

CASO DE ESTUDIO 36.1 Manufactura de equipos de televisión por Sony Corporation

Los ejecutivos de Sony Corporation se enfrentaron a una situación confusa a mediados de la década de 1980. Los equipos de televisión manufacturados en instalaciones de producción japonesas se vendían más rápido que los producidos en la fábrica de San Diego en California, Estados Unidos, aun cuando se producen con diseños idénticos. No había indicadores que distinguieran a los equipos hechos en Japón de los

elaborados en Estados Unidos ni razones visibles para la discrepancia. Sin embargo, las investigaciones revelaron que los equipos producidos en Japón eran superiores a la versión estadounidense dado que, por ejemplo, la nitidez del color era mejor y los tonos más brillantes. Como en las tiendas permanecían encendidos, los consumidores detectaban fácilmente el modelo con la mejor imagen y lo compraban.

Aunque la diferencia en la calidad de la imagen era obvia, las razones de esta diferencia no estaban claras. Para mayor confusión, estaba la afirmación constante de que la fábrica de San Diego tenía establecido un programa de calidad total y que la planta mantenía estándares de control de calidad de modo que no se produjeran partes defectuosas. Aunque las instalaciones japonesas no tenían un programa de calidad total, se hacía énfasis en reducir las variaciones de parte a parte.

Investigaciones adicionales descubrieron un patrón común en un circuito integrado que era crítico en cuanto a la densidad del color. En la figura 36.2a se muestra la distribución de las partes que cumplían el objetivo de diseño del color; en la figura 36.2b aparece la función de pérdida de Taguchi para dichas partes. En la fábrica de San Diego, donde el número de partes defectuosas se minimizaba (en este caso, a cero), se tenía una distribución uniforme dentro de los límites de la especificación.

Las instalaciones japonesas en realidad producían partes fuera de la especificación de diseño, pero la desviación estándar con respecto de la media era menor. Utilizando la función de pérdida de Taguchi (vea el ejemplo 36.1), quedó claro que la fábrica de San Diego perdía cerca de \$1.33 por unidad, mientras que su similar japonesa perdía \$0.44 por unidad.

El punto de vista de la calidad tradicional afirmaría que una distribución uniforme sin defectos es superior a otra en la que se produjeran unos cuantos defectos pero la mayoría de las partes estuvieran más cerca del objetivo de los valores de diseño. Sin embargo, los consumidores pueden detectar de inmediato cuál producto es mejor y el mercado demuestra que minimizar las desviaciones es una meta benéfica de la calidad.

Fuente: Basado en D. M. Byrne y G. Taguchi.

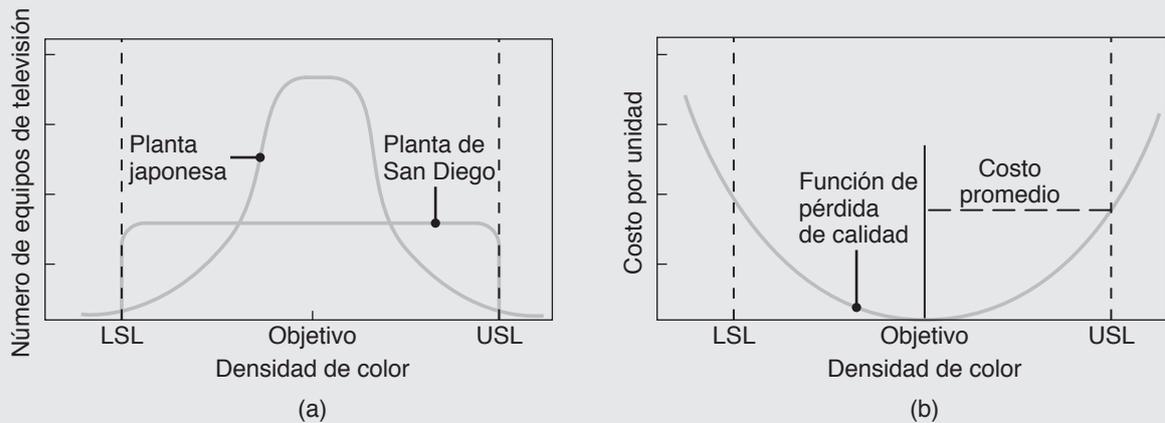


FIGURA 36.2 (a) Distribución del valor de la función objetivo para la densidad del color de equipos de televisión. (b) Función de pérdida de Taguchi que muestra el costo promedio del reemplazo por unidad para corregir los problemas de calidad. Fuente: Basado en G. Taguchi.

EJEMPLO 36.2 Incrementar la calidad sin aumentar el costo del producto

Un fabricante de mosaicos de arcilla notó que se producían muchos desperdicios debido a las variaciones de temperatura en el horno que se usaba para hornear los mosaicos, lo que perjudicaba las utilidades de la compañía. La primera solución que consideró el fabricante fue comprar nuevos hornos con mejores controles de temperatura; sin embargo, esta solución requeriría una inversión de capital importante. Entonces, se emprendió un estudio para determinar si podían hacerse modificaciones en la composición de la arcilla de manera que fuera menos sensible a las fluctuaciones de la temperatura durante el horneado.

Con base en el diseño factorial de experimentos, en el cual se estudian simultáneamente los factores involucrados en el proceso y sus interacciones, se descubrió que aumentar el contenido de cal de la arcilla provocaba que los mosaicos fueran menos sensibles a las variaciones de temperatura durante el horneado. Se implementó esta modificación (que también era la de más bajo costo), lo que redujo sustancialmente el desperdicio y mejoró la calidad.

36.6 Los estándares ISO y QS

Los clientes de todo el mundo demandan cada vez más productos y servicios de alta calidad a precios bajos y buscan proveedores que respondan a esta aspiración de manera consistente y confiable. Esta tendencia en el mercado global, a su vez, ha creado la necesidad de conformidad y consenso internacional con respecto al establecimiento de métodos de control de calidad, confiabilidad y seguridad de los productos. Además de estas consideraciones hay otras igualmente importantes acerca del medio ambiente y calidad de vida que deben abordarse.

36.6.1 El estándar ISO 9000

Publicado por primera vez en 1987 y revisado en 1994, el estándar ISO 9000 (**Estándares para la administración y aseguramiento de la calidad**) es una serie deliberadamente general de estándares de sistemas de administración de la calidad. Ha influido permanentemente en la manera en que las compañías manufactureras hacen negocios en el comercio mundial y se ha convertido en el estándar mundial de la calidad.

La serie ISO 9000 incluye los estándares siguientes:

- **ISO 9001** —*Sistemas de calidad: modelo para el aseguramiento de la calidad en el diseño/desarrollo, producción, instalación y servicio.*
- **ISO 9002** —*Sistemas de calidad: modelo para el aseguramiento de la calidad en la producción e instalación.*
- **ISO 9003** —*Sistemas de calidad: modelo para el aseguramiento de la calidad en la inspección final y pruebas.*
- **ISO 9004** —*Elementos del sistema de calidad y su administración: lineamientos.*

Las compañías se registran de manera voluntaria para estos estándares y obtienen certificados. Por lo general, se busca el registro para ISO 9001 o 9002 y algunas empresas lo hacen para el ISO 9003. El estándar 9004 es simplemente un lineamiento y no un modelo o base de registro. Para obtener el registro, se visitan las plantas de la compañía y son auditadas por equipos de terceros acreditados e independientes con el fin de certificar que los 20 elementos clave del estándar están implementados y funcionan en forma apropiada.

En la visita, el registro se recomienda o no en función del grado en que la compañía no cumpla los requerimientos del estándar. El equipo de auditoría no aconseja o consulta con la organización la forma de corregir las discrepancias, sino que sólo describe la naturaleza del incumplimiento. Para mantener la certificación se requieren auditorías periódicas. El proceso de certificación toma de seis meses a un año, o más, y llega a costar decenas de miles de dólares, lo que depende del tamaño de la empresa, del número de plantas y de la línea de productos.

El estándar ISO 9000 no es la certificación de un producto sino la **certificación de un proceso de calidad**. Las compañías establecen sus propios criterios y prácticas para la calidad. Sin embargo, el sistema documentado para ello debe cumplir con el estándar ISO 9000; entonces, una compañía no puede incluir en el sistema ningún criterio que se oponga al espíritu del estándar. El registro simboliza el compromiso de la organización de adoptar prácticas consistentes, según lo especifica su propio sistema de calidad (como la calidad en el diseño, desarrollo, producción, instalación y servicio), e incluye la documentación apropiada de dichas prácticas. De esta manera, los consumidores (incluso las instituciones gubernamentales) están seguros de que el proveedor del producto o servicio (que puede estar o no en el mismo país) sigue prácticas específicas. En realidad, las compañías manufactureras que se certifican sobre dichas prácticas son evaluadas con respecto a si sus proveedores tienen también el registro ISO 9000; por lo tanto, sus proveedores también deben estar registrados.

36.6.2 Estándar QS 9000

El estándar QS 9000 fue desarrollado en forma conjunta por Chrysler, Ford y General Motors y se publicó por primera vez en 1994. Antes de su desarrollo, cada una de estas compañías automotrices tenía su propio estándar sobre los requerimientos de su sistema de calidad. El estándar ISO/TS 16949 sustituyó al QS 9000 en 2002 y su objetivo es que se aplique en toda la cadena de suministro. Se pide a los proveedores automotrices de primer nivel que, a su vez, verifiquen que sus proveedores obtengan el registro en este estándar.

36.6.3 Estándar ISO 14000

El ISO 14000 es una familia de estándares publicados en 1996 y que se refieren a **sistemas internacionales de administración ambiental** (EMS, por sus siglas en inglés). Está dirigido a la manera en que las actividades de una organización afectan el medio ambiente durante la vida de sus productos (vea también la sección I.6 en la introducción general). Estas actividades (a) pueden ser internas o externas a la organización; (b) van desde la producción hasta la eliminación final del producto después de su vida útil y (c) incluyen los efectos en el ambiente, como la contaminación, generación de desperdicios y su eliminación; ruido, agotamiento de los recursos naturales y uso de energía.

La familia de estándares ISO 14000 tiene varias secciones: Lineamientos para Auditorías Ambientales, Evaluación Ambiental, Declaraciones y Clasificaciones Ambientales y Administración Ambiental. La ISO 14001, *Requerimientos de los Sistemas de Administración Ambiental*, consta de secciones denominadas Requerimientos Generales, Política Ambiental, Planeación, Implementación y Operación, Verificación y Acción Correctiva y Revisión de la Administración.

36.7 Métodos estadísticos de control de calidad

Debido a las numerosas variables involucradas en los procesos y operaciones de manufactura, resulta esencial implementar *métodos estadísticos de control de calidad*. Las siguientes son algunas de las variables de observación más comunes:

- Herramientas de corte, dados y moldes que sufren desgaste, por lo que con el tiempo varían las dimensiones y características de la superficie de las partes.
- La maquinaria tiene diferente desempeño, en función de su calidad, edad, condiciones y nivel de mantenimiento; las máquinas más antiguas tienden a traquetear y vibrar, son difíciles de ajustar y no mantienen las tolerancias.
- La eficacia de los fluidos de trabajo de metales disminuye conforme se degradan; debido a ello resultan perjudicados la vida de herramientas y dados, el acabado e integridad de la superficie de la pieza de trabajo, así como los requerimientos de fuerzas y energía.
- Las condiciones ambientales como la temperatura, humedad y calidad del aire en la planta cambian de una a otra hora, lo que afecta el desempeño de máquinas y trabajadores.
- Los envíos de diferentes lotes, y en distintos momentos, de la materia prima a una planta tienen muy distintas dimensiones, propiedades, características de la superficie y calidad general.
- La atención del operador varía durante el día o de un trabajador a otro.

Estos eventos ocurren al *azar* —es decir, sin ninguna tendencia o patrón en particular— y se llaman **variaciones aleatorias** o **causas especiales**; las que se pueden rastrear hasta *causas específicas* reciben el nombre de **variaciones asignables** o **causas comunes**.

Aunque desde hace siglos se ha reconocido la existencia de la **variabilidad** en las operaciones de producción, fue E. Whitney (1765-1825), inventor estadounidense y fabricante de armamento, el primero que comprendió todo su significado al observar que era indispensable tener *partes intercambiables* en la producción masiva de armas de fuego. Los conceptos estadísticos modernos relevantes para la ingeniería de manufactura se desarrollaron por primera vez a principios de la década de 1900; W. A. Shewhart (1891-1967), físico, ingeniero y estadístico, destacó notablemente en este aspecto.

36.7.1 Control estadístico de la calidad

El *control estadístico de la calidad* (SQC, por sus siglas en inglés) implica el uso de la teoría de la probabilidad junto con pruebas de subconjuntos aleatorios de las partes producidas para obtener la comprensión de su calidad. Para usar en forma apropiada el control estadístico de la calidad es necesario definir primero los siguientes términos de uso común:

- **Tamaño de la muestra:** número de partes que se van a inspeccionar en una muestra. Las propiedades de las partes que constituyen la muestra se estudian para obtener información acerca de la población total.
- **Muestreo aleatorio:** extraer una muestra de una población o lote, en el cual cada parte tiene la misma probabilidad de formar parte de la muestra.
- **Población:** el total de partes individuales del mismo diseño del cual se toman muestras; también se denomina el **universo**.
- **Tamaño del lote:** tamaño de un subconjunto de la población. Se consideran subconjuntos de la población a uno o más lotes y son representativos de la población.

Se inspecciona la muestra con respecto a varias características y rasgos, como las tolerancias, acabado superficial y defectos, utilizando los instrumentos y técnicas descritos en el capítulo 35 y en las secciones 36.10 y 36.11. Estas características caen en dos categorías: (a) las que se miden de manera cuantitativa (*método de variables*) y (b) las que se miden en forma cualitativa (*método de atributos*).

1. El **método de variables** es la *medición cuantitativa* de las características de la parte, como dimensiones, tolerancias, acabado de la superficie y propiedades físicas o mecánicas. Las mediciones se hacen por cada unidad presente en el grupo que se estudia y después se comparan los resultados contra las especificaciones.
2. El **método de atributos** implica la observación de la presencia o ausencia de *características cualitativas* (como defectos externos o internos de las partes maquinadas, formadas o soldadas, y abolladuras en las partes hechas de placas metálicas) presentes en cada unidad del grupo en estudio. El tamaño de la muestra para los datos del tipo de atributos por lo general es mayor que para los del tipo de variables.

Considere la medición de los diámetros de ejes maquinados que se producen en un torno. Por varias razones, descritas en este capítulo, los diámetros variarán. Cuando se recopilan los diámetros medidos de los ejes torneados en una población dada, uno o más tendrán el diámetro más pequeño y uno o más tendrán el más grande. El resto de los ejes tendrá diámetros ubicados entre esos dos extremos.

Todas las mediciones del diámetro se agrupan y dibujan en una gráfica de barras llamada *histograma*, la cual representa el número de partes en cada grupo de diámetros (figura 36.3a). Las barras muestran una **distribución**, también llamada **diseminación** o **dispersión**, de las mediciones del diámetro. La *curva en forma de campana* que se ilustra

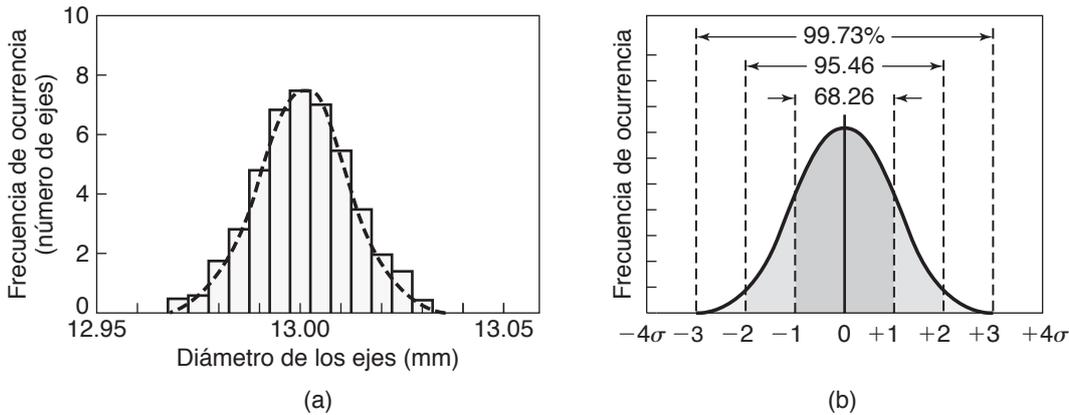


FIGURA 36.3 (a) Histograma del número de ejes medidos y sus diámetros respectivos; este tipo de curva se llama distribución de frecuencia. (b) Curva de la distribución normal que indica las áreas dentro de cada rango de desviación estándar; observe que cuanto mayor es el rango, más grande es el porcentaje de partes que caen en él.

en la figura 36.3a se llama **distribución de frecuencia** y muestra la frecuencia con la cual se produce cada diámetro de las partes.

Los datos procedentes de los procesos de manufactura a menudo forman patrones representados por la **curva de distribución normal** (figura 36.3b), llamada *de Gauss* en honor de K. F. Gauss (1777-1855), un matemático y físico alemán que la desarrolló como base de la *probabilidad*. La curva de distribución normal con forma de campana ajustada a los datos que se ilustra en la figura 36.3a tiene dos características. En primer lugar, muestra que la mayoría de los diámetros tienden a agruparse alrededor de un *valor promedio* (**media aritmética**); se designa con \bar{x} y se calcula con la expresión

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}, \tag{36.3}$$

donde el numerador es la suma de todos los valores medidos (diámetros de los ejes) y n es el número de mediciones (número de ejes).

La segunda característica de esta curva es su ancho, el cual indica la **dispersión** de los diámetros medidos; cuanto más ancha sea la curva mayor será la dispersión. La diferencia entre el valor más grande y el más chico se llama **rango**, R :

$$R = x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}}. \tag{36.4}$$

La dispersión se estima por medio de la **desviación estándar**, dada por la expresión

$$\sigma = \frac{\sqrt{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}}{n - 1}, \tag{36.5}$$

donde x_i es el valor medido de cada parte.

A partir del numerador de la ecuación (36.5) observe que, a medida que la curva se ensancha, la desviación estándar se hace mayor y σ tiene las mismas unidades que x_i . Como se conoce el número de partes torneadas que cae dentro de cada grupo, puede

calcularse el porcentaje de la población total representada por cada grupo. Entonces, la figura 36.3b muestra que en la medición de los diámetros de los ejes,

- 99.73% de la población cae dentro del rango de $\pm 3\sigma$,
- 95.46% está dentro de $\pm 2\sigma$, y
- 68.26% se localiza en el rango de $\pm 1\sigma$.

Estas cantidades son válidas sólo para distribuciones que son normales, como las que aparecen en la figura 36.3, y no tienen sesgo. Se observará que sólo 0.27% cae más allá del rango de $\pm 3\sigma$, lo cual significa que habrá 2700 partes defectuosas por cada millón de partes producidas. En la manufactura moderna eso no es una proporción aceptable porque con ese nivel de defectos ninguna computadora moderna funcionaría de manera confiable.

36.7.2 Seis Sigma

El *seis sigma* es un conjunto de herramientas estadísticas basadas en los principios de administración de la calidad total que mide *continuamente* la calidad de procesos y servicios. Aunque el seis sigma indica que hay 3.4 partes defectuosas por cada millón, incluye consideraciones como la comprensión de las *capacidades del proceso* (que se describen en la sección 36.8.2) para producir artículos libres de defectos y garantizar así la satisfacción del consumidor. Este método se centra en (a) definir problemas de calidad; (b) medir las cantidades relevantes y (c) analizar, controlar y mejorar los procesos y operaciones.

Como se estableció en la sección 36.7.1, el rango de tres sigma generaría 0.27% de partes defectuosas, tasa inaceptable en la manufactura moderna. Asimismo, en las industrias de servicios esa proporción ocasionaría 270 millones de operaciones erróneas con tarjetas de crédito tan sólo en Estados Unidos. Se ha estimado que las compañías que operan con niveles de tres a cuatro sigma pierden alrededor de 10 a 15% de sus ingresos totales debido a los defectos. Se han de hacer grandes esfuerzos para eliminar virtualmente todos los defectos de los productos, procesos y servicios y tener ahorros estimados en miles de millones de dólares. Debido a su gran impacto en los negocios, en el presente se reconoce que seis sigma es una buena filosofía de la administración.

36.8 Control estadístico del proceso

Si el número de partes que no cumplen los estándares comienza a incrementarse durante una corrida de producción, es esencial determinar la causa (como los materiales en bruto, controles de la máquina, degradación de los fluidos de trabajo, aburrimiento del operador, entre otros) y emprender la acción apropiada. Aunque a primera vista esta afirmación parece evidente, a principios de la década de 1950 se empezó a desarrollar un método estadístico sistemático para guiar a los operadores de las plantas de manufactura.

El método estadístico notifica al operador para que tome ciertas medidas y acciones y le dice cuándo tomarlas para evitar la producción de más partes defectuosas. Esta técnica se conoce como *control estadístico del proceso* (SPC, por sus siglas en inglés) y consta de los elementos siguientes:

- Gráficas y límites de control.
- Capacidades del proceso de manufactura particular.
- Características de la maquinaria implicada.

36.8.1 Gráficas de control de Shewhart

La curva de distribución de frecuencia que se ilustra en la figura 36.3b indica un rango de los diámetros de los ejes producidos que caería más allá del rango de tolerancia del diseño. En la figura 36.4 aparece la misma curva en forma de campana, pero ahora incluye las *tolerancias especificadas* para el diámetro de los ejes torneados.

Las *gráficas de control* representan de manera gráfica las variaciones de un proceso a lo largo del tiempo; consisten en datos que se toman y grafican *durante* la producción. Es común que haya dos gráficas. La cantidad \bar{x} (figura 36.5a) es el promedio de cada subconjunto de muestras tomadas e inspeccionadas; digamos que cada subconjunto consta de cinco partes. Un tamaño de muestra entre 2 y 10 partes es suficientemente exacto (aunque es mejor tomar más partes), siempre y cuando el tamaño de la muestra se mantenga constante durante la inspección.

La frecuencia del muestreo depende de la naturaleza del proceso; algunas operaciones requieren un muestreo continuo, en tanto que otras sólo necesitan que se tome una muestra por día. Los analistas del control de calidad están bien calificados para determinar esta frecuencia para una operación particular. Como las mediciones que aparecen en la figura 36.5a se hacen en forma consecutiva, la abscisa de las gráficas de control también representa al tiempo.

En esta figura, la línea continua horizontal es el **promedio de los promedios (gran promedio)**, que se denota con $\bar{\bar{x}}$, y representa la media de la población. Las líneas punteadas horizontales superior e inferior indican los **límites de control** para el proceso. Los límites de control se establecen en estas gráficas de acuerdo con fórmulas de control estadístico diseñadas para mantener la producción real dentro de niveles de variación aceptables. Un método común es asegurar que todas las partes estén dentro de tres desviaciones estándar de la media ($\pm 3\sigma$).

La desviación estándar también se puede expresar como función del rango. Entonces, para \bar{x} ,

$$\begin{aligned} \text{Límite superior de control (UCL}_{\bar{x}}) \\ = \bar{\bar{x}} + 3\sigma = \bar{\bar{x}} + A_2\bar{R} \end{aligned} \quad (36.6)$$

y

$$\begin{aligned} \text{Límite inferior de control (LCL}_{\bar{x}}) \\ = \bar{\bar{x}} - 3\sigma = \bar{\bar{x}} - A_2\bar{R}, \end{aligned} \quad (36.7)$$

donde A_2 se obtiene de la tabla 36.2 y \bar{R} es el promedio de los valores de R . Las cantidades $\bar{\bar{x}}$ y \bar{R} se calculan a partir de las mediciones tomadas.

Los límites de control se calculan con base en la anterior capacidad de producción del equipo, no están asociados con ninguna especificación de la tolerancia o dimensiones de diseño. Indican los límites dentro de los cuales se espera que caiga normalmente cierto porcentaje de los valores medidos, debido a las variaciones inherentes del proceso en sí y en el que se basan los límites. La meta principal del control estadístico del proceso es mejorar el proceso de manufactura con ayuda de las gráficas de control, así como eliminar las causas asignables. La gráfica de control indica de manera continua el avance en esta área.

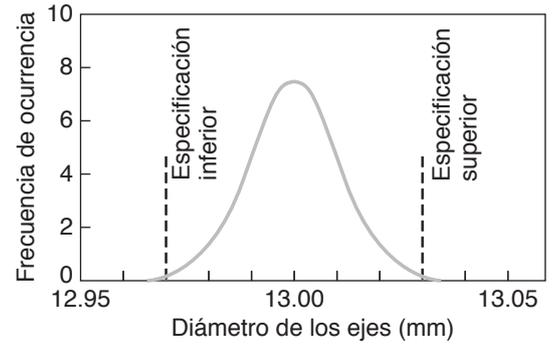


FIGURA 36.4 Curva de distribución de frecuencia, se aprecian los límites inferior y superior de la especificación.

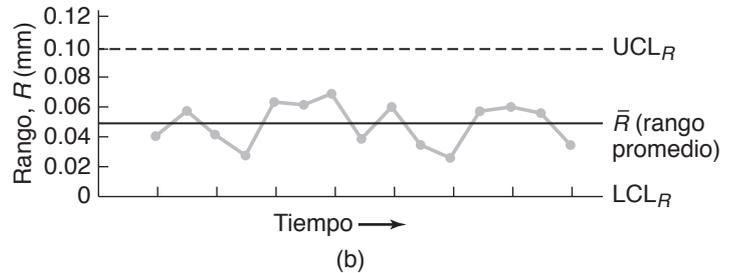
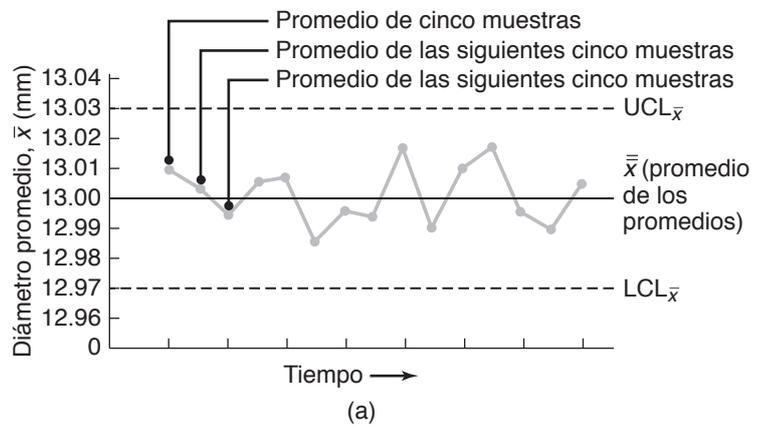


FIGURA 36.5 Gráficas de control usadas en el control estadístico de calidad; el proceso está en buen control estadístico porque todos los puntos caen entre los límites inferior y superior. En esta ilustración, el tamaño de la muestra es 5 y el número de muestras es 15.

TABLA 36.2

Constantes para las gráficas de control				
Tamaño de la muestra	A_2	D_4	D_3	d_2
2	1.880	3.267	0	1.128
3	1.023	2.575	0	1.693
4	0.729	2.282	0	2.059
5	0.577	2.115	0	2.326
6	0.483	2.004	0	2.534
7	0.419	1.924	0.078	2.704
8	0.373	1.864	0.136	2.847
9	0.337	1.816	0.184	2.970
10	0.308	1.777	0.223	3.078
12	0.266	1.716	0.284	3.258
15	0.223	1.652	0.348	3.472
20	0.180	1.586	0.414	3.735

La segunda gráfica de control, que se muestra en la figura 36.5b, indica el rango, R , en cada subconjunto de muestras. La línea horizontal continua representa el promedio de los valores de R en el lote, denotado como \bar{R} , y es una medida de la variabilidad de las muestras. Los límites de control superior e inferior para R se obtienen de las ecuaciones:

$$UCL_R = D_4 \bar{R} \tag{36.8}$$

y

$$LCL_R = D_3 \bar{R}, \tag{36.9}$$

donde las constantes D_4 y D_3 se toman de los valores dados en la tabla 36.2. La tabla también incluye la constante d_2 , la cual se usa para estimar la desviación estándar de la distribución del proceso que se muestra en la figura 36.4 a partir de la ecuación

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2}. \tag{36.10}$$

Cuando la curva de una gráfica de control es como la que se muestra en la figura 36.5a, se dice que el proceso está en *buen control estadístico*, esto significa que

- No hay una tendencia discernible en el patrón de la curva.
- Los puntos (valores medidos) son aleatorios a lo largo del tiempo.
- Los puntos no exceden los límites de control.

Puede verse que en curvas como las de las figuras 36.6a, b y c hay ciertas *tendencias*. Por ejemplo, observe que a la mitad de la curva de la figura 36.6a, el diámetro de los ejes aumenta con el tiempo, razón por la que puede haber un cambio en alguna de las variables del proceso, como el desgaste de la herramienta de corte.

Si la tendencia es consistente hacia diámetros grandes, como en la curva de la figura 36.6b, con diámetros alrededor del límite superior de control, puede significar que los parámetros de preparación del torno sean incorrectos y, como resultado, las partes torneadas sean demasiado grandes de manera consistente. La curva de la figura 36.6c muestra dos tendencias distintas, que tal vez se deban a factores como un cambio en las propiedades del material en bruto o en el desempeño del fluido de corte (es decir, su degradación). Estas situaciones ponen al proceso *fuera de control*; para limitar este efecto en ocasiones se establecen límites a $\pm 2\sigma$.

El análisis de los patrones y tendencias en las gráficas de control requiere una experiencia considerable con el fin de identificar las causas específicas de una situación fuera de control. Entre dichas causas puede haber una o más de las variables que se listan al principio de la sección 36.7. El *exceso de control* del proceso de manufactura (es decir, establecer los límites de control superior e inferior demasiado cercanos entre sí, lo que resulta en un rango muy angosto de la desviación estándar) es otra causa de las situaciones fuera de control, es la razón por la cual los límites de control se calculan con base en la *variabilidad del proceso* y no en criterios potencialmente inaplicables.

Es evidente que la capacitación del operador es crítica para la implementación exitosa del SPC en el taller. Una vez establecidos los lineamientos de control del proceso, los operadores también deben tener alguna responsabilidad en hacer los ajustes de los procesos que comiencen a salirse de control. Las capacidades de los operadores individuales también se toman en cuenta de modo que no se les sobrecargue con datos de entrada y fallen en su interpretación.

Ahora esta tarea se simplifica mucho gracias a software especial. Por ejemplo, las lecturas digitales de los equipos electrónicos de medición se integran hoy directamente en un sistema de cómputo para el SPC en tiempo real. La figura 35.2 muestra uno de dichos sistemas de funciones múltiples en el que un microprocesador analiza la salida de un cali-

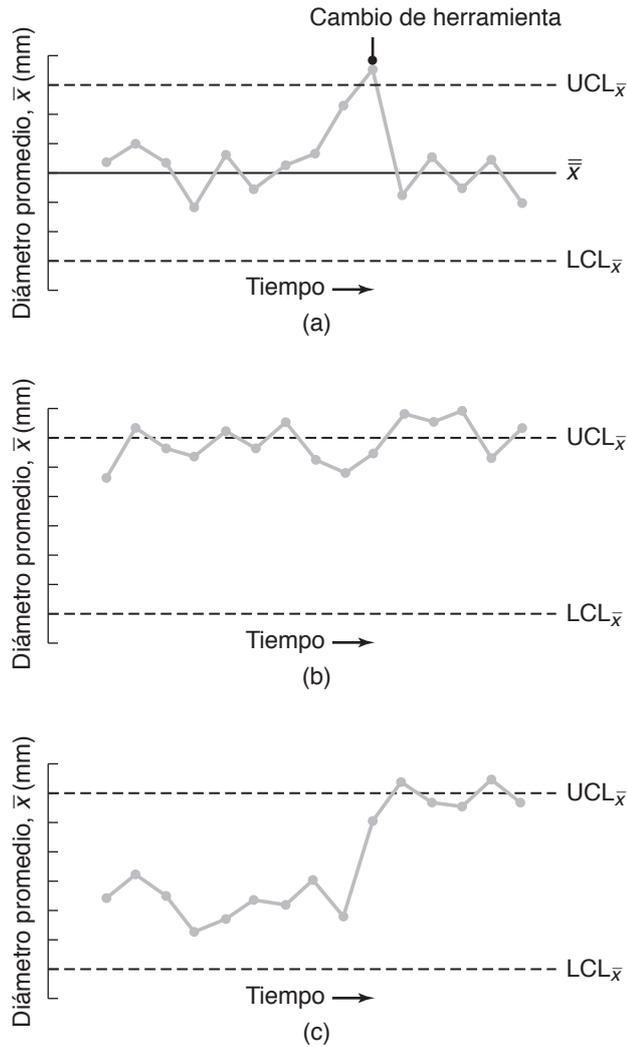


FIGURA 36.6 Gráficas de control. (a) El proceso comienza a salirse de control debido a factores como el desgaste de la herramienta (*inclinación*); se cambia la herramienta y el proceso está ahora bajo control estadístico. (b) Los parámetros del proceso no están establecidos apropiadamente; entonces todas las partes están alrededor del límite superior de control (*cambio de la media*). (c) El proceso queda fuera de control por factores como el cambio en las propiedades del material en bruto (*cambio de la media*).

brador o micrómetro digital, en tiempo real, y lo muestra en varias maneras como curvas de distribución de frecuencia y gráficas de control.

36.8.2 Capacidad del proceso

A la posibilidad de un proceso de producir partes sin defectos en una producción controlada se le denomina *capacidad del proceso*. Indica que un proceso de manufactura en particular produce partes de manera consistente y repetida dentro de límites específicos de precisión (figura 36.7). Para determinar la capacidad del proceso se usan varios índices que describen la relación entre la variabilidad del proceso y la dispersión de los límites inferior y superior de la especificación. Como es normal que un proceso de manufactura comprenda materiales, maquinaria y operadores, cuando las capacidades de un proceso no cumplen con los límites de la especificación se analiza cada factor individualmente con el fin de identificar el problema.

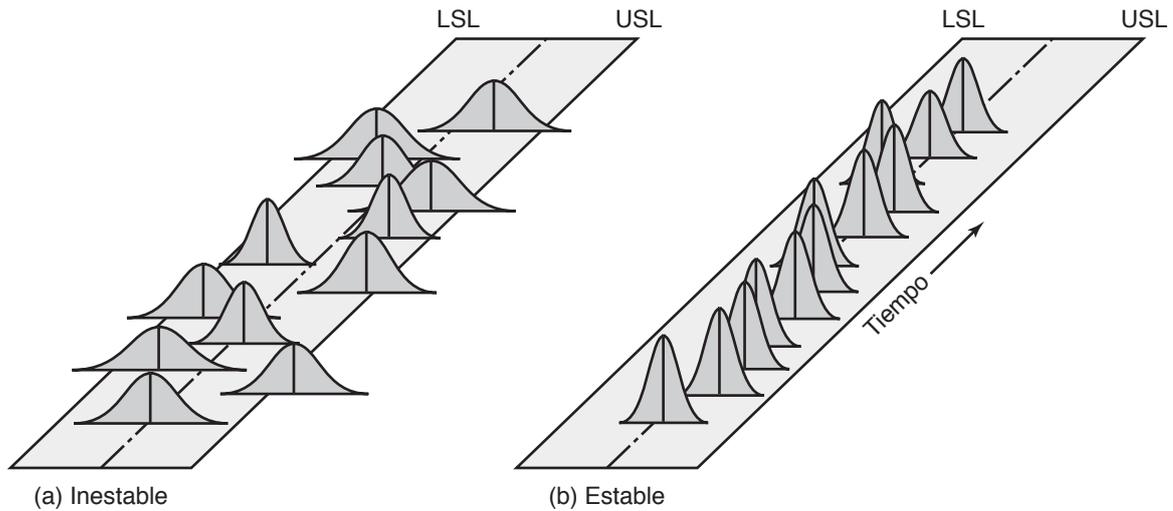


FIGURA 36.7 Ilustración de procesos que son (a) inestables o están fuera de control y (b) estables o están bajo control. Observe que en (b) todas las distribuciones tienen desviaciones estándar menores que las que se muestran en (a) y que sus medias están más cercanas al valor deseado. Fuente: Basado en K. Crow.

EJEMPLO 36.3 Cálculo de los límites del control y de la desviación estándar

Dado: Los datos que aparecen en la tabla 36.3 muestran mediciones de longitud (en pulgadas) tomadas sobre una pieza de trabajo maquinada. El tamaño de la muestra es 5 y el número de muestras es 10; entonces, el total de partes medidas es 50. La cantidad $\bar{\bar{x}}$ es el promedio de las cinco mediciones de cada muestra.

Se solicita: Determinar los límites superior e inferior de control y la desviación estándar de la población de las partes maquinadas.

Respuesta: El promedio de los promedios, $\bar{\bar{x}}$, es

$$\bar{\bar{x}} = \frac{44.296}{10} = 4.430 \text{ pulg.}$$

El promedio de los valores R es

$$\bar{R} = \frac{1.03}{10} = 0.103 \text{ pulg.}$$

Como el tamaño de la muestra es cinco, se determinan las constantes siguientes a partir de la tabla 36.2: $A_2 = 0.577$, $D_4 = 2.115$ y $D_3 = 0$. Ahora se pueden calcular los límites de control a partir de las ecuaciones (36.4) a (36.7).

TABLA 36.3

Datos para el ejemplo 36.3							
Número de muestra	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	\bar{x}	R
1	4.46	4.40	4.44	4.46	4.43	4.438	0.06
2	4.45	4.43	4.47	4.39	4.40	4.428	0.08
3	4.38	4.48	4.42	4.42	4.35	4.410	0.13
4	4.42	4.44	4.53	4.49	4.35	4.446	0.18
5	4.42	4.45	4.43	4.44	4.41	4.430	0.04
6	4.44	4.45	4.44	4.39	4.40	4.424	0.06
7	4.39	4.41	4.42	4.46	4.47	4.430	0.08
8	4.45	4.41	4.43	4.41	4.50	4.440	0.09
9	4.44	4.46	4.30	4.38	4.49	4.414	0.19
10	4.42	4.43	4.37	4.47	4.49	4.436	0.12

Entonces, para los promedios,

$$\begin{aligned} UCL_{\bar{x}} &= 4.430 + (0.577)(0.103) \\ &= 4.489 \text{ pulg.} \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned} LCL_{\bar{x}} &= 4.430 - (0.577)(0.103) \\ &= 4.371 \text{ pulg.} \end{aligned}$$

Para los rangos,

$$UCL_R = (2.115)(0.103) = 0.218 \text{ pulg.}$$

y

$$LCL_R = (0)(0.103) = 0 \text{ pulg.}$$

De la ecuación (36.10), para un valor de $d_2 = 2.326$, la desviación estándar, σ , para la población se estima como

$$\sigma = \frac{0.103}{2.326} = 0.044 \text{ pulg.}$$

36.8.3 Muestreo de aceptación y control

El *muestreo de aceptación* consiste en tomar algunas muestras aleatorias de un lote para inspeccionarlas y decidir si todo el lote es aceptable o debe rechazarse, o manufacturarlo de nuevo. Esta técnica estadística se desarrolló en la década de 1920, se usó mucho durante la Segunda Guerra Mundial para elaborar equipos militares (MIL STD 105), y aún se utiliza ampliamente. El muestreo de aceptación es útil en particular para inspeccionar partes con gran producción cuando sería demasiado costoso inspeccionar al 100%. Hay determinados equipos críticos, como marcapasos y prótesis, por ejemplo, que deben sujetarse a 100% de inspección.

Se han preparado varios planes de muestreo de aceptación, tanto para estándares militares como nacionales en Estados Unidos, con base en una proporción aceptable, predeterminada y limitada de partes incluidas en una muestra que no cumplan los requerimientos establecidos. Si dicho porcentaje se rebasa, todo el lote se rechaza o se elabora de nuevo, si fuera factible en lo económico. Tenga presente que en el muestreo de aceptación el número real de muestras es significativo, pero no los porcentajes del lote que están en la muestra.

Cuanto más grande sea el número de muestras tomadas de un lote, mayor es la probabilidad de que una de ellas contenga partes defectuosas y menor es la probabilidad de aceptar el lote. La **probabilidad** se define como la ocurrencia relativa de un evento. La probabilidad de aceptación se obtiene por medio de varias curvas características, un ejemplo de lo cual se muestra en la figura 36.8.

Comúnmente, el **nivel de calidad de aceptación** (AQL, por sus siglas en inglés) se define como el nivel en el que hay una probabilidad de 95% de aceptar el lote. Este porcentaje indica al fabricante que 5% de las partes del lote podrían ser rechazadas por el consumidor (**riesgo del productor**); de la misma manera, el consumidor sabe que 95% de las partes son aceptables (**riesgo del consumidor**).

El fabricante puede rescatar aquellos lotes que no cumplan los estándares de calidad, por medio de una inspección secundaria de rectificación. En este método se inspecciona 100% del lote rechazado y se retiran las partes defectuosas. El proceso es lento y costoso y es un incentivo importante para el fabricante para que mejore sus procesos de producción.

El muestreo de aceptación requiere menos tiempo e inspecciones que otros métodos de muestreo. En consecuencia, la inspección de las partes es más detallada. Se han desarrollado técnicas de inspección automática (sección 36.12) de modo que puede ser posible y económico inspeccionar 100% de todas las partes.

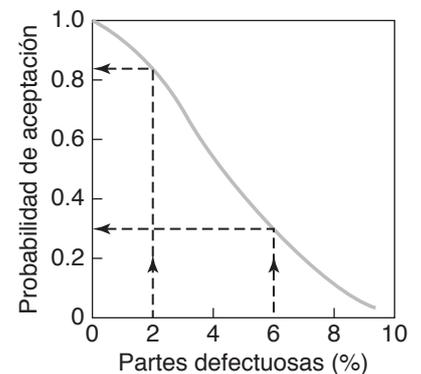


FIGURA 36.8 Curva común de características de operación que se usa en el muestreo de aceptación; cuanto más grande sea el porcentaje de partes defectuosas, menor será la probabilidad de aceptación por parte del consumidor.

36.9 Confiabilidad de los productos y procesos

Todos los productos fallan eventualmente, de una u otra manera: las llantas de los automóviles se desgastan, los motores eléctricos se queman, los calentadores de agua comienzan a gotear, los dados y herramientas de corte se desgastan o rompen y la maquinaria deja de funcionar apropiadamente. La **confiabilidad del producto** se define en general como la probabilidad de que un producto desempeñe sin fallas la función para la que se diseñó, en un ambiente dado y durante un periodo específico de uso normal por parte del consumidor.

Cuanto más crítica sea la aplicación de un producto en particular, mayor debe ser su confiabilidad. Así, la confiabilidad de una turbina de avión, un instrumento médico o un cable de elevador, por ejemplo, debe ser mucho mayor que la de un grifo de cocina o un lapicero. A partir de los temas descritos en este capítulo, se puede observar que a medida que se incrementa la calidad de cada componente de un producto, también lo hace la confiabilidad de la totalidad del producto.

Predecir la confiabilidad implica relaciones matemáticas y cálculos complejos. Es obvia la importancia de predecir la confiabilidad de los componentes críticos de los aviones civiles y militares. También es importante la confiabilidad de una línea de producción de alta velocidad, automatizada y controlada por computadora, con todos sus complejos componentes mecánicos y electrónicos, ya que su falla ocasiona grandes pérdidas económicas para el fabricante.

La **confiabilidad del proceso** se define como la capacidad de que un proceso de manufactura en particular opere de manera predecible y sin problemas a lo largo del tiempo. Está implícito que no debe haber un deterioro significativo en el desempeño, pues de otra manera se requeriría apagar las máquinas, interrumpir la producción y tener una pérdida económica importante.

36.10 Pruebas no destructivas

Las *pruebas no destructivas* (NDT, por sus siglas en inglés) se llevan a cabo de manera que la integridad del producto y la textura de su superficie no sufren cambios. Las técnicas empleadas por lo general requieren un operador de considerable habilidad y la interpretación exacta de los resultados de la prueba, que puede ser difícil de ejecutar. Sin embargo, el amplio uso de gráficas de computadora y otras técnicas de mejora ha reducido en forma significativa la probabilidad de un error humano. Los sistemas actuales tienen varias capacidades para obtener datos y hacer el análisis cualitativo y cuantitativo de la inspección.

Líquidos penetrantes. En esta técnica se aplican fluidos a las superficies de la parte y se permite que penetren en grietas, sellos y poros (figura 36.9). Por capilaridad, el líquido se filtra en grietas tan pequeñas de hasta $0.1 \mu\text{m}$ ($4 \mu\text{pulg}$) de ancho. Dos tipos comunes de líquido que se utilizan para esta prueba son (a) *penetrantes fluorescentes*, con varias sensibilidades y que fosforecen ante luz ultravioleta, y (b) *penetrantes visibles*, que usan colorantes (rojo, generalmente) y aparecen como líneas brillantes en la superficie de la pieza de trabajo.

El método de los líquidos penetrantes se usa para detectar varios defectos de la superficie. El equipo es sencillo y fácil de usar, portátil y menos costoso de operar que otros métodos. Sin embargo, el método sólo detecta defectos que estén abiertos a la superficie o sean externos.

Inspección de partículas magnéticas. Esta técnica consiste en colocar partículas ferromagnéticas muy finas sobre la superficie de la parte. Las partículas se aplican secas o en un medio líquido, como agua o aceite. Cuando la parte es magnetizada por un campo magnético, una discontinuidad (defecto) presente en la superficie hace que las partículas se agrupen visiblemente alrededor del defecto (figura 36.10). Las partículas

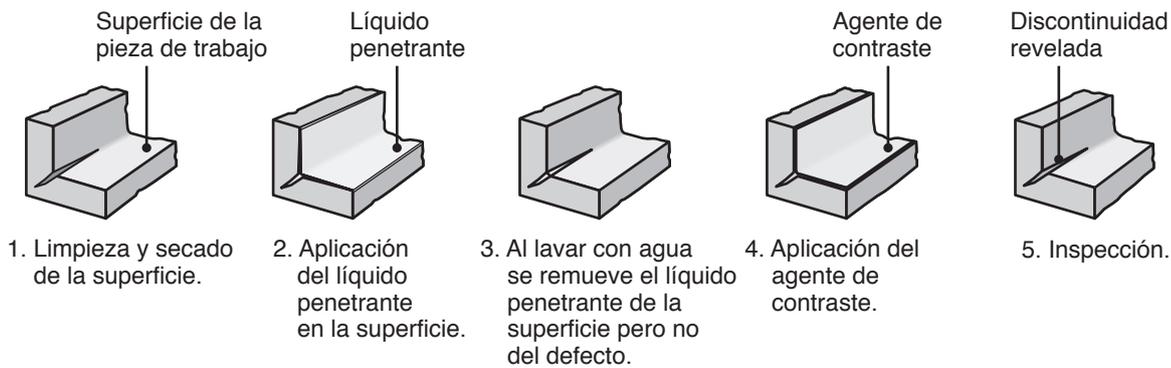


FIGURA 36.9 Secuencia de operaciones de la inspección con líquido penetrante para detectar la presencia de grietas y otros defectos en una pieza de trabajo. *Fuente:* Reimpreso con permiso de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.

ferromagnéticas se colorean con pigmentos para darles mejor visibilidad sobre superficies metálicas.

Después, el defecto se convierte en un imán debido a las fugas de flujo en las que las líneas del campo magnético son interrumpidas por el defecto; a su vez, esto crea un polo *N-S* a pequeña escala en cualquier lado del defecto conforme las líneas del campo salen de la superficie. Las partículas por lo general adoptan la forma y el tamaño del defecto. Con este método también pueden detectarse defectos bajo la superficie, siempre y cuando no sean demasiado profundos. Los campos magnéticos se generan con corriente directa o alterna y con arneses, barras y bobinas. Los defectos bajo la superficie se detectan mejor con CD. El método de las partículas magnéticas también se usa en materiales ferromagnéticos puros, pero las partes tienen que desmagnetizarse y limpiarse después de la inspección. El equipo es portátil o estacionario.

Inspección ultrasónica. En esta técnica un haz ultrasónico recorre la parte; un defecto interno (como una grieta) interrumpe el haz y refleja una parte de la energía ultrasónica. La amplitud de la energía reflejada y el tiempo requerido para su regreso indican la presencia y ubicación de cualquier defecto en la pieza de trabajo.

Las ondas ultrasónicas son generadas por transductores, llamados *unidades* o *sondas rastreadoras*, que existen en varios tipos y formas. Los transductores operan con el principio de la *piezoelectricidad* (sección 3.7) y usan materiales como el cuarzo, sulfato de litio o varios cerámicos. La mayoría de las inspecciones se efectúan a una frecuencia de 1 a 25 MHz. Los acopladores, como agua, aceite, glicerina y grasa, se usan para transmitir las ondas ultrasónicas del transductor a la pieza de prueba. El método de la inspección ultrasónica tiene gran poder de penetración y sensibilidad. También se puede usar desde varias direcciones para inspeccionar defectos en partes grandes como ruedas de ferrocarril, recipientes a presión y bloques de dados. El método requiere personal experimentado para realizar la inspección en forma adecuada e interpretar los resultados correctamente.

Métodos acústicos. La técnica de *emisión acústica* (vea también la sección 21.5.4) detecta señales (ondas de esfuerzos de alta frecuencia) generadas por la pieza de trabajo en sí durante su deformación plástica, el inicio y propagación de grietas, su transformación de fase y una reorientación abrupta de los límites de grano. Otras fuentes de señales acústicas son la formación de burbujas durante la ebullición de un líquido y la fricción y desgaste de superficies deslizantes.

La inspección por emisión acústica se suele realizar sometiendo a tensión elástica la parte o estructura, como flexionar una viga, aplicar un par motor a un eje o por presurización interna de un recipiente. Es común que sensores constituidos por elementos cerámicos

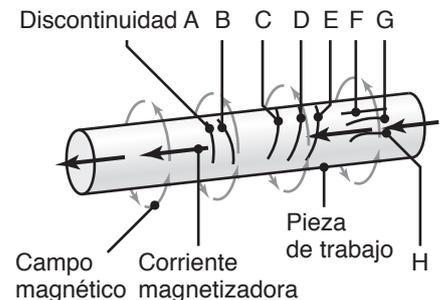


FIGURA 36.10 Ilustración esquemática de la inspección con partículas magnéticas de un producto que tiene un defecto. Las grietas en dirección paralela al campo magnético (como la discontinuidad A) no serían detectadas, en tanto que las otras que se muestran sí lo serían. Las discontinuidades F, G y H son las más fáciles de detectar. *Fuente:* Reimpreso con permiso de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.

piezoeléctricos sean los que detecten las emisiones acústicas. Este método es eficaz en particular para la vigilancia continua de estructuras con rodamientos de carga.

La **técnica de impacto acústico** consiste en golpear la superficie de un objeto, escuchar las señales producidas y analizarlas para detectar discontinuidades y defectos. El principio es básicamente el mismo que cuando se golpean paredes, escritorios o mostradores en varios lugares, con un dedo o martillo, y se escucha el sonido emitido. Las piedras de rectificado vitrificadas (sección 26.2) se prueban de una manera parecida (llamada *prueba de anillo*) para detectar grietas que podrían no ser visibles a simple vista. La técnica de impacto acústico es fácil de efectuar y se puede instrumentar y automatizar.

Radiografía. La *radiografía* comprende la inspección con rayos X para detectar defectos internos como grietas y porosidad. La técnica detecta diferencias en la densidad al interior de una parte. Así, por ejemplo, en una imagen de rayos X el metal que rodea a un defecto en general es más denso y se ve más brillante que los defectos. La fuente de radiación generalmente es un tubo de rayos X y se forma una imagen permanente y visible en una película o papel radiográfico (figura 36.11a). Para producir muy rápido imágenes de rayos X también se usan **fluoroscopios**; se trata de una técnica de radiografía en tiempo real que muestra los eventos a medida que ocurren. La radiografía requiere equipo caro y la interpretación apropiada de los resultados, además conlleva el peligro de la radiación.

Tres técnicas radiográficas son:

- **Radiografía digital.** La película es sustituida por un arreglo lineal de detectores (figura 36.11b). El haz de rayos X tiene una colimación en forma de abanico (compare las figuras a y b) y la pieza de trabajo se mueve en forma vertical. Los detectores captan digitalmente la radiación y los datos se guardan en la memoria de una computadora; después el monitor despliega los datos de la pieza de trabajo como una imagen en dos dimensiones.

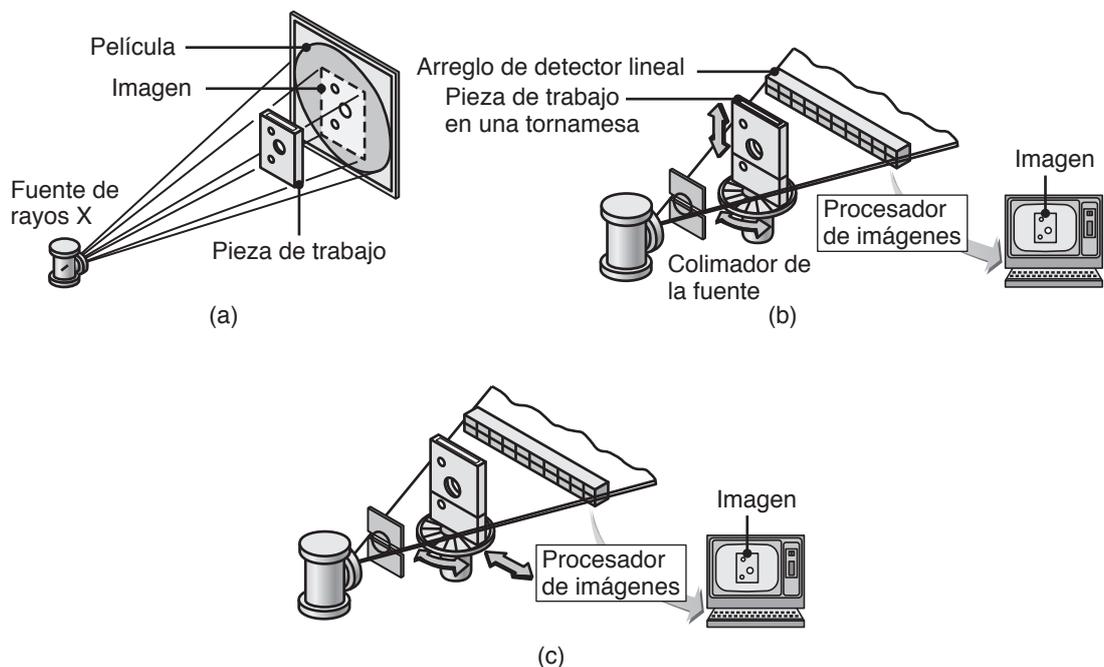


FIGURA 36.11 Tres métodos de inspección radiográfica: (a) radiografía convencional; (b) radiografía digital y (c) tomografía computarizada. Fuente: Reimpreso con permiso de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.

- **Tomografía computarizada.** Esta técnica se basa en el mismo sistema descrito para la radiografía digital, excepto que la pieza de trabajo gira a lo largo de un eje vertical conforme se mueve verticalmente (figura 36.11c) y el monitor produce imágenes de rayos X de secciones transversales delgadas de la pieza de trabajo. La traslación y rotación de la pieza de trabajo proporcionan varios ángulos desde los cuales se observa el objeto con precisión.
- **Tomografía asistida por computadora (escaneo CAT, por sus siglas en inglés).** Esta técnica se basa en el mismo principio que la anterior y se usa mucho en la práctica y el diagnóstico médicos.

Inspección por corrientes parásitas (de Eddy). Este método se basa en el principio de *inducción electromagnética*. La parte se sitúa en o junto a una bobina eléctrica por la que fluye una corriente alterna (excitadora) a frecuencias de 60 Hz a 6 MHz. La corriente genera corrientes parásitas que fluyen en la parte. Los defectos presentes en la parte causan impedancia, cambian la dirección de las corrientes parásitas (figura 36.12) y producen cambios en el campo electromagnético. Estos cambios afectan a la bobina excitadora (bobina de inspección), cuyo voltaje se monitorea para determinar la presencia de defectos. Las bobinas de inspección se pueden fabricar en varios tamaños y formas para adaptarse a la parte que se inspecciona. Las partes deben ser conductoras de electricidad y la profundidad a que se detectan los defectos suele limitarse a 13 mm (0.5 pulg.). La técnica requiere utilizar una muestra estándar de referencia para calibrar la sensibilidad del equipo de prueba.

Inspección térmica. La *inspección térmica* implica el uso de sensores del calor por contacto o no contacto que detectan cambios de temperatura. Los defectos en la pieza de trabajo (como grietas y uniones defectuosas, regiones despegadas en las estructuras laminadas) causan un cambio en la distribución de la temperatura. En la **inspección termográfica** se aplican materiales como pinturas y papeles sensibles al calor, cristales líquidos y otros recubrimientos, a la superficie de la pieza de trabajo; cualquier cambio en su color o aspecto indican defectos. El método más común de inspección termográfica sin contacto utiliza detectores infrarrojos (por lo general microscopios y cámaras de barrido infrarrojo) que tienen una respuesta buena en el tiempo y sensibilidades muy bajas, de hasta 1 °C (2 °F). La **inspección termométrica** utiliza dispositivos como termopares, radiómetros y pirómetros, e inclusive materiales como crayones de cera.

Holografía. La *técnica holográfica* crea una imagen tridimensional de la parte por medio de un sistema óptico (figura 36.13). Como por lo general se usa en formas simples y superficies muy pulidas, esta técnica registra la imagen en una película fotográfica.

El uso de la holografía se ha extendido a la **interferometría holográfica** para la inspección de partes de varias formas y rasgos de su superficie. Al emplear técnicas de doble y múltiple exposición, mientras la parte se sujeta a fuerzas externas o variaciones dependientes del tiempo, cualquier cambio en las imágenes revela defectos en la parte.

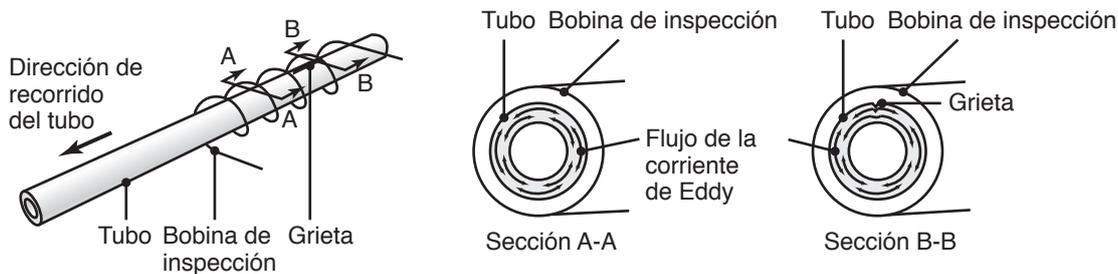


FIGURA 36.12 Cambios en el flujo de una corriente parásita causados por un defecto en una parte. Fuente: Reimpreso con permiso de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.

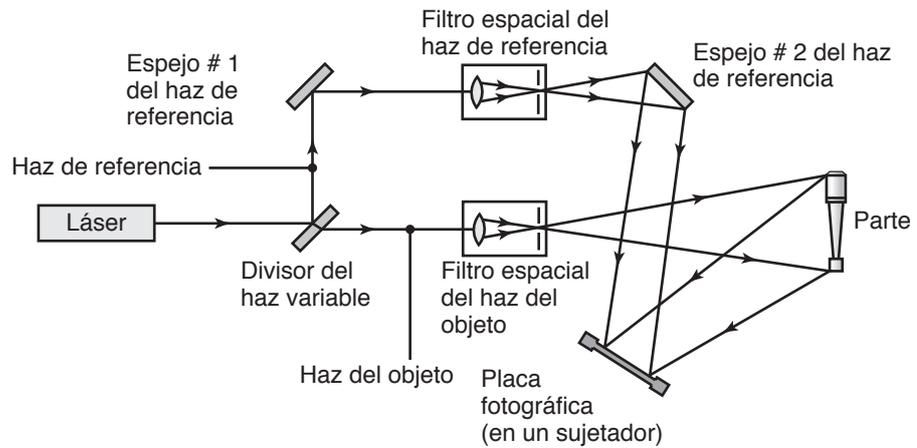


FIGURA 36.13 Ilustración esquemática del sistema óptico básico usado en elementos holográficos de radiografía para detectar defectos. *Fuente:* Reimpreso con permiso de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.

- **Holografía acústica.** La información acerca de defectos internos se obtiene directamente a partir de la imagen del interior de la parte. En la *holografía acústica de superficie líquida*, se sumergen en un tanque lleno de agua la parte y dos transductores ultrasónicos (uno para el haz del objeto y otro para el haz de referencia). Entonces se obtiene una imagen a partir de las ondas formadas en el tanque.
- **Holografía acústica de barrido.** Se usa un solo transductor y se produce un holograma por medio de la detección de fase electrónica. Además de ser más sensible, el equipo en general es portátil y se adapta a piezas de trabajo muy grandes utilizando una columna de agua en lugar de un tanque.

36.11 Pruebas destructivas

Como lo sugiere el nombre, la parte que se estudia con métodos de *pruebas destructivas* no conserva su integridad, forma o características de su superficie. Los métodos mecánicos de prueba, descritos en el capítulo 2, son todos destructivos en el sentido de que tiene que retirarse del producto una muestra o espécimen con el fin de someterlo a la prueba. Ejemplos de otras pruebas destructivas incluyen la de la velocidad de piedras de rectificado para determinar su velocidad de falla (sección 26.4) y la prueba de alta presión de recipientes para determinar su presión de falla.

Las pruebas de dureza que dejan indentaciones relativamente grandes (figuras 2.13 y 2.14) también se consideran destructivas. Sin embargo, las pruebas de microdureza se consideran no destructivas debido al pequeño tamaño de las indentaciones permanentes que se producen; esta diferencia se basa en la suposición de que el material no es sensible a las indentaciones (vea la sección 2.9), como es común en el caso de los materiales frágiles. Por lo general, la mayoría de vidrios, metales muy tratados con calor y los materiales cerámicos son sensibles a las indentaciones; en consecuencia, una pequeña indentación producida por el probador reduce significativamente su resistencia y tenacidad.

36.12 Inspección automatizada

Por tradición, las partes y subensambles individuales se manufacturan en lotes, se envían a laboratorios de control de calidad (**inspección posproceso**) y, si aprueban, pasan a for-

mar parte del inventario. Si las partes no pasan la inspección de calidad, se les desecha o se conservan y utilizan sobre la base de que tienen cierta desviación aceptable a partir del estándar. Las partes también se pueden inspeccionar inmediatamente después de que se producen (**inspección durante el proceso**).

En contraste, la *inspección automatizada* utiliza varios sistemas de sensores que monitorean los parámetros relevantes durante la operación de manufactura (**inspección en línea**). Con el empleo de las mediciones obtenidas, el proceso se autocorrigue en forma automática con el fin de producir partes aceptables. De esa manera es innecesario tener más inspección de la parte en otro sitio de la planta. El desarrollo de sensores exactos y sistemas avanzados de control por computadora ha facilitado mucho la integración de la inspección automatizada con las operaciones de manufactura (capítulos 37 y 38). Esa integración asegura que ninguna parte avance de un proceso a otro (como una operación de torneado seguida de otra de rectificado cilíndrico) a menos que esté hecha correctamente y cumpla con los estándares establecidos en la primera operación.

La inspección automatizada es flexible y responde a los cambios de diseño del producto. Además, gracias al equipo automatizado se requiere menos habilidad del operador, se incrementa la productividad y las partes tienen más calidad, exactitud dimensional y confiabilidad.

Sensores para la inspección automatizada. Los continuos avances en la tecnología de sensores, descrita en la sección 37.7, han hecho factible el monitoreo en tiempo real de los procesos de manufactura. Directa o indirectamente, y con el uso de diferentes sondas, los sensores detectan dimensiones, acabado de la superficie, temperatura, fuerza, potencia, vibración, desgaste de la herramienta y la presencia de defectos.

Los sensores operan con base en los principios de las medidas de voltaje, inductancia, capacitancia, medición ultrasónica, acústica, neumática, por radiación infrarroja, óptica, láseres o diferentes medidas electrónicas. Pueden ser *táctiles* (con contacto) o *no táctiles*. Están conectados con microprocesadores y computadoras para mostrar datos gráficos (vea también *controladores lógicos programables*, sección 37.2.6). Esta capacidad permite el ajuste rápido en línea de cualquier parámetro del procesamiento, lo que da como resultado la producción de partes que están consistentemente dentro de los estándares especificados. Dichos sistemas ya son un equipo estándar en las máquinas herramienta (descritas en la parte IV de este libro).

RESUMEN

- La calidad debe construirse en los productos. El aseguramiento de la calidad tiene que ver con varios aspectos de la producción, como diseño, manufactura, ensamble y, especialmente, la inspección en cada una de sus etapas para estar de acuerdo con las especificaciones.
- El método tradicional de inspeccionar una parte después de haber sido fabricada ha sido sustituido en gran medida por la inspección en línea y de 100% de todas las partes que se manufacturan.
- El control estadístico de la calidad y el control del proceso son indispensables en la manufactura moderna; son importantes en particular en la producción de partes intercambiables y en la reducción de los costos de manufactura.
- Aunque todos los métodos del control de calidad tienen sus límites de aplicación, la implementación de la administración total de la calidad, los estándares ISO y QSO 9000, así como el ISO 14000, están entre los desarrollos más significativos de la administración de la calidad en la manufactura.
- Para la inspección de las partes producidas existen varias técnicas de pruebas no destructivas y destructivas, cada una de las cuales tiene sus propias aplicaciones, ventajas y limitaciones.

TÉRMINOS CLAVE

Administración total de la calidad	Desviación estándar	Límite superior de control	Rango
Aseguramiento de la calidad	Diseño de experimentos	Límites de control	Retorno económico de la calidad
Calidad	Diseño factorial	Límites de la especificación	Riesgo del consumidor
Capacidad del proceso	Dispersión	Mejora continua	Riesgo del productor
Causa común	Distribución	Método de atributos	Robustez
Causa especial	Distribución de frecuencia	Método de variables	Seis sigma
Círculo de calidad	Estadística	Métodos de Deming	Sensores
Confiabilidad	Estándares ISO	Métodos de Juran	Sistemas de administración ambiental
Confiabilidad del proceso	Estándares QS	Métodos Taguchi	Tamaño de la muestra
Confiabilidad del producto	Función de pérdida de Taguchi	Muestreo aleatorio	Tamaño del lote
Control estadístico de la calidad	Gráficas de control	Muestreo de aceptación	Variabilidad
Control estadístico del proceso	Gráficas de control de Shewhart	Nivel de calidad de aceptación	Variaciones aleatorias
Control total de la calidad	Gran promedio	Población	Variaciones asignables
Curva de la distribución normal	Inspección automatizada	Prevención de defectos	
	Kaizen	Probabilidad	
	Límite inferior de control	Pruebas destructivas	
		Pruebas no destructivas	

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, T. T., *Introduction to Engineering Statistics and Lean Sigma: Statistical Quality Control and Design of Experiments and Systems*, 2a. ed., Springer, 2010.
- Bendell, A., *Taguchi Methods*, Springer, 2007.
- Besterfield, D. H., *Quality Control*, 8a. ed., Prentice Hall, 2008.
- Breyfogl, F. W., *Implementing Six Sigma*, Wiley, 2003.
- De Feo, J. y Juran, J. M., *Juran's Quality Handbook*, 6a. ed., McGraw-Hill, 2010.
- DeVor, R. E., Chang T. y Sutherland, J. W., *Statistical Quality Design and Control*, 2a. ed., Prentice Hall, 2006.
- Fowlkes, W. Y., *Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*, Pearson/Education, 2012.
- Imai, M., *Gemba Kaizen: A Commonsense Approach to Continuous Improvement*, 2a. ed., McGraw-Hill, 2012.
- Joglekar, A., *Statistical Methods for Six Sigma: In R&D and Manufacturing*, Wiley, 2004.
- Montgomery, D. C., *Introduction to Statistical Quality Control*, 7a. ed., Wiley, 2012.
- Pyzdek, T. y Keller, P., *The Six Sigma Handbook*, 3a. ed., McGraw-Hill, 2009.
- Ryan, T. P., *Modern Experimental Design*, Wiley, 2007.
- Ryan, T. P., *Statistical Methods for Quality Engineering*, 3a. ed., Wiley, 2011.
- Schilling, E. G. y Neubauer, D. V., *Acceptance Sampling in Quality Control*, 2a. ed., Chapman y Hall/CRC, 2009.
- Smith, G. M., *Statistical Process Control and Quality Improvement*, 5a. ed., Prentice Hall, 2003.
- Taguchi, G., Chowdhury, S. y Wu, Y., *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, Wiley-Interscience, 2004.
- Wang, J. X., *Engineering Robust Designs with Six Sigma*, Prentice Hall, 2005.
- Yang, G., *Life Cycle Reliability Engineering*, Wiley, 2007.

PREGUNTAS DE REPASO

- 36.1** Defina los términos tamaño de la muestra, muestreo aleatorio, población y tamaño del lote.
- 36.2** ¿Qué son las variaciones aleatorias?
- 36.3** Explique la diferencia entre el método de variables y el método de atributos.
- 36.4** Defina la desviación estándar. ¿Por qué es importante en la manufactura?
- 36.5** Describa qué significa el control estadístico del proceso.
- 36.6** ¿Cuándo se encuentra fuera de control un proceso? Explique.
- 36.7** Explique por qué se desarrollan las gráficas de control. ¿Cómo se usan?
- 36.8** ¿Qué es una función de pérdida? ¿Cómo se usa?
- 36.9** ¿Qué indican los límites de control?
- 36.10** Defina la capacidad del proceso. ¿Cómo se usa?
- 36.11** ¿Qué es el muestreo de aceptación? ¿Por qué se desarrolló?
- 36.12** Investigue en la bibliografía técnica y explique la diferencia entre la confiabilidad en serie y en paralelo.
- 36.13** ¿Qué significa la calidad seis sigma?

36.14 Explique la diferencia entre (a) probabilidad y confiabilidad y (b) robustez y confiabilidad.

36.15 ¿Cómo se usan los líquidos penetrantes y qué pueden detectar?

36.16 Dé tres ejemplos de pruebas no destructivas que midan propiedades de los materiales.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

36.17 Explique por qué se hacen esfuerzos continuos para construir calidad en los productos.

36.18 Dé ejemplos de productos para los que no es posible o factible hacer muestreo de 100%.

36.19 ¿Cuál es la consecuencia de establecer las especificaciones inferior y superior cerca del pico de la curva en la figura 36.4?

36.20 Identifique varios factores que hagan que un proceso se salga de control.

36.21 Describa situaciones en las que sea inevitable la necesidad de técnicas de prueba destructivas.

36.22 ¿Cuáles de las técnicas de inspección no destructiva son apropiadas para los materiales no metálicos? ¿Por qué?

36.23 ¿Cuáles son las ventajas de la inspección automatizada? ¿Por qué se ha convertido en parte importante de la ingeniería de manufactura?

36.24 ¿Por qué es importante la confiabilidad en la ingeniería de manufactura? Dé varios ejemplos.

36.25 Dé ejemplos de la técnica de inspección por impacto acústico que no sean los mencionados en este capítulo.

36.26 Explique por qué las mediciones *PASA* y *NO PASA* (vea la sección 35.4.4) son incompatibles con la filosofía Taguchi.

36.27 Revise el caso de estudio 36.1 y haga una lista de las lecciones importantes que se ilustran.

36.28 Ponga en una lista las ventajas y desventajas de incorporar la fluoroscopia como herramienta de inspección en línea.

36.29 Busque en la bibliografía técnica y dé ejemplos de diseño robusto, además del que se muestra en la figura 36.1.

36.30 ¿La ecuación (36.10) dará resultados exactos? ¿Por qué sí o por qué no?

36.31 ¿Qué es la función de pérdida de Taguchi? ¿Cuál es su importancia?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

36.32 Los fabricantes de latas para bebidas tratan de lograr rangos de falla de menos de una en diez mil. Si esto corresponde a una calidad de n sigma, encuentre el valor de n .

36.33 Suponga que en el ejemplo 36.3, el número de muestras es de 8 y no de 10. Con el empleo de la mitad superior de los datos de la tabla 36.3, vuelva a calcular los límites de control y la desviación estándar. Compare sus observaciones con los resultados obtenidos usando 10 muestras.

36.34 Calcule los límites de control para los promedios y rangos para (a) número de muestras = 8, (b) $\bar{\bar{x}} = 65$ y (c) $R = 6$.

36.35 Calcule los límites de control para (a) número de muestras = 6, (b) $\bar{\bar{x}} = 36.5$ y (c) $UCL_R = 5.75$.

36.36 En una inspección con un tamaño de muestra de 12 y número de muestras de 40, se encontró que el rango promedio era de 14 y el promedio de los promedios era 80. Calcule los límites de control para promedios y rangos.

36.37 Determine los límites de control para los datos mostrados en la tabla siguiente:

x_1	x_2	x_3	x_4
0.57	0.61	0.50	0.55
0.59	0.55	0.60	0.58
0.55	0.50	0.55	0.51
0.54	0.57	0.50	0.50
0.58	0.58	0.60	0.56
0.60	0.61	0.55	0.61
0.58	0.55	0.61	0.53

36.38 Se determinó que el promedio de los promedios de un número de muestras de tamaño 9 fue 124. El rango de promedios era de 17.82 y la desviación estándar de 4. Las siguientes mediciones se tomaron de una muestra: 121, 130, 125, 130, 119, 131, 135, 121 y 128. ¿Está el proceso bajo control?

36.39 Un fabricante está haciendo baleros de rodamientos (vea la figura 13.15a). La superficie interior tiene una especificación para la rugosidad de la superficie de $0.10 \pm 0.006 \mu\text{m}$. Las mediciones tomadas en los baleros indican una rugosidad media de $0.112 \mu\text{m}$, con desviación estándar de $0.02 \mu\text{m}$. Se manufacturan 5000 baleros por mes y el costo de rechazar uno defectuoso es de \$10.00. Se sabe que si se cambiaran los lubricantes por una emulsión especial la rugosidad media sería esencialmente igual a la especificación de diseño. ¿Cuál es el costo adicional por mes que justifica el lubricante?

36.40 Para los datos del problema 36.39, suponga que el cambio de lubricante haría que el proceso de manufactura produjera una rugosidad de $0.10 \pm 0.01 \mu\text{m}$. ¿Qué costo adicional por mes justificaría cambiar el lubricante? Si el lubricante no agregara ningún costo nuevo, ¿usted recomendaría su empleo?

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

36.41 ¿Cuáles aspectos de los conceptos del control de calidad de Deming, Taguchi y Juran son en su opinión difíciles de implementar en una instalación de manufactura común? ¿Por qué?

36.42 Describa sus reflexiones acerca de si los productos deben diseñarse y construirse para cierta vida esperada. ¿Dependería su respuesta de si fueran productos para el consumidor o industriales? Explique.

36.43 Investigue en la bibliografía técnica disponible, contacte a varias asociaciones y prepare una tabla exhaustiva acerca de la esperanza de vida de varios productos para el consumidor.

36.44 Los 14 puntos de Deming se formularon como las características de una compañía que produce artículos de alta calidad, de modo que se produzcan muy pocos defectos. ¿Podrían usarse las mismas reglas para minimizar la huella de carbono de una empresa? Explique.

36.45 ¿Sería deseable incorporar técnicas de inspección no destructiva en la maquinaria para trabajar metales? Dé un ejemplo específico, elabore un dibujo de dicha máquina y explique sus características.

36.46 Mencione algunas variables del material y del proceso que inciden en la calidad del producto en el trabajo de metales por (a) fundido, (b) formado y (c) maquinado.

36.47 Identifique las técnicas no destructivas que son capaces de detectar defectos internos y las que sólo detectan los externos.

36.48 Explique la diferencia entre la inspección de partes manufacturadas durante el proceso y posterior a éste. ¿Qué tendencias hay en dichas inspecciones? Explique.

36.49 Revise la tabla 36.1 y describa los cambios que ocurrirían si su profesor incorporara los 14 puntos de Deming.

36.50 Muchos componentes de productos tienen un efecto mínimo en la robustez y calidad de la parte. Por ejemplo, las bisagras de la guantera de un automóvil no tienen ningún efecto en la satisfacción del cliente, además la guantera se abre con tan poca frecuencia que es fácil lograr un diseño robusto. ¿Usted aconsejaría usar los métodos Taguchi (como la función de pérdida) en este tipo de componente? Explique.

36.51 Se le pide que diseñe un sistema de inspección automática para una operación de corte ortogonal (sección 21.2). ¿Qué propiedad o propiedades trataría de medir y con qué instrumentos o sondas?

La manufactura en un ambiente competitivo

PARTE

IX

En un mercado global altamente competitivo en cuanto a bienes para el consumidor e industriales, los avances en los procesos, maquinaria, herramientas y operaciones de manufactura están impulsados por metas que pueden resumirse como sigue:

- Los productos deben cumplir completamente los **requerimientos, especificaciones y estándares de diseño y servicio**.
- Las actividades de manufactura deben buscar continuamente mayores niveles de **calidad y productividad**; la calidad debe construirse en el producto en cada etapa del diseño y de la manufactura.
- Los procesos y operaciones de manufactura deben tener **flexibilidad** suficiente para responder con rapidez a las demandas en constante cambio del mercado.
- Deben explorarse e implementarse los **métodos más económicos** de manufactura.

Aunque las máquinas herramienta de control numérico, que iniciaron a principios de la década de 1950, fueron un factor clave para llegar a la manufactura moderna, gran parte del avance en las actividades manufactureras depende de nuestra capacidad para considerar dichas actividades y operaciones como un *gran sistema*, con interacciones que con frecuencia son complejas entre todos sus componentes. Con la aplicación del *método de sistemas* en la manufactura, varias funciones y actividades que por largo tiempo habían sido entidades separadas y diferentes ahora se han *integrado y optimizado*.

Como el primero de los cuatro capítulos de la parte final de este libro, el capítulo 37 introduce el concepto de *automatización* y su implementación en términos de los desarrollos clave en el control numérico y, posteriormente, en el control numérico por computadora. Esta introducción va seguida de la descripción de los avances realizados en la automatización y el control, lo cual comprende temas importantes como control adaptativo, robots industriales, tecnología de sensores, manejo y movimiento de materiales, sistemas de ensamble y cómo se implementan en la producción moderna.

En el capítulo 38 se describe cómo se integran los sistemas de manufactura y sus componentes y operaciones individuales, así como el rol crítico de las computadoras, comunicaciones y otras *tecnologías de soporte* como ayuda para las actividades de diseño, ingeniería y manufactura del producto, así como en la planeación del proceso. Las tecnologías de soporte incluyen robots industriales, tecnología de sensores, control adaptativo, sujeción flexible y sistemas de ensamble.

En el capítulo 39 se describe la manufactura integrada por computadora, con sus diversas características como la manufactura celular, sistemas flexibles de manufactura, producción justo a tiempo, manufactura esbelta e inteligencia artificial.

El objetivo del capítulo 40 es resaltar la importancia de los numerosos, y a menudo complejos, factores y sus interacciones que tienen un gran efecto en la manufactura competitiva en un mercado global. Entre los factores implicados están el diseño del producto, calidad y ciclo de vida del producto; la selección de los materiales y procesos y su reemplazo en la producción; las capacidades del proceso y los costos implícitos, inclusive los de maquinaria, herramientas y mano de obra.

Automatización de los procesos y operaciones de manufactura

CAPÍTULO 37

- Este capítulo describe la automatización en todos los aspectos de los procesos y operaciones de manufactura, por medio de la cual las partes se producen de manera confiable y exacta, con altas tasas de producción y en forma económica. Comienza con la descripción de los tipos de automatización y sus diferentes aplicaciones.
- Después se estudia la flexibilidad en la manufactura por medio del control numérico en las máquinas, con descripciones detalladas de sus características importantes.
- El capítulo también investiga las diferentes estrategias de control que pueden usarse, incluye las de lazo abierto, lazo cerrado y control adaptativo.
- Luego se revisan los robots industriales, incluyendo sus capacidades y lineamientos para las aplicaciones. Posteriormente se analiza la tecnología de sensores y sus importantes aplicaciones.
- El capítulo concluye con la descripción exhaustiva de los dispositivos y sistemas flexibles de ensamble, así como sus consideraciones de diseño.

37.1	Introducción	1059
37.2	Automatización	1061
37.3	Control numérico	1068
37.4	Control adaptativo	1074
37.5	Manejo y movimiento de materiales	1077
37.6	Robots industriales	1078
37.7	Tecnología de sensores	1085
37.8	Sujeción flexible	1089
37.9	Sistemas de ensamble	1090
37.10	Consideraciones de diseño para la sujeción, el ensamble, desensamble y servicio	1094
37.11	Consideraciones económicas	1096

37.1 Introducción

Hasta principios de la década de 1950, la mayor parte de las operaciones de una planta común de manufactura se llevaban a cabo en maquinaria tradicional como tornos, fresadoras, taladros y diversos equipos para formar, moldear y unir materiales. Dichos equipos, por lo general, carecían de flexibilidad y requerían una mano de obra de considerable habilidad para producir partes con exactitud dimensional y características de superficie aceptables. Además, cada vez que se manufacturaba un producto tenían que volverse a colocar herramientas en la maquinaria, los accesorios tenían que prepararse o modificarse y debía readecuarse el movimiento de los materiales entre las diferentes máquinas. El desarrollo de nuevos productos y partes con formas complejas requería numerosos intentos por ensayo y error por parte del operador con el fin de establecer los parámetros de procesamiento apropiados. Asimismo, debido al involucramiento humano, con frecuencia era difícil, tardado y costoso fabricar partes que fueran exactamente iguales.

Estas circunstancias significaban que los métodos de procesamiento por lo general eran ineficientes y que los costos de la mano de obra fueran una parte significativa del costo total de producción. La necesidad de reducir la participación de la mano de obra en el costo del producto era cada vez más evidente, al igual que la de mejorar la eficiencia y flexibilidad de las operaciones de manufactura.

La **productividad** también se convirtió en una gran preocupación; generalmente se le define como el rendimiento por empleado por hora, y básicamente mide la eficiencia de la operación. Una operación eficiente hace un uso óptimo de todos los recursos, como materiales, energía, capital, mano de obra, maquinaria y tecnologías disponibles. Con los rápidos avances de la ciencia y tecnología de la manufactura, la eficiencia de

EJEMPLO:

37.1	Origen histórico del control numérico	1069
------	---------------------------------------	------

CASO DE ESTUDIO:

37.1	Eliminación robotizada de las rebabas en un trineo moldeado por soplado	1084
------	---	------

las operaciones de manufactura comenzó a mejorar y el porcentaje de la mano de obra como parte del costo total empezó a disminuir.

En la década anterior, en todo el mundo proliferaron las *zonas de libre comercio*. Un efecto de esto es que las operaciones o productos de la manufactura intensivos en mano de obra, como mobiliario, zapatería, ropa y ensambles, se mudaron a regiones donde los costos de mano de obra son bajos (vea la tabla I.7 en la introducción general). Aun así, los países con costos elevados de mano de obra tratan de ser competitivos, sobre todo por lograr incrementos significativos en la productividad.

Los elementos importantes para mejorar la productividad han sido la *mecanización*, *automatización* y *control* del equipo y sistemas de manufactura, así como la amplia adopción de comunicaciones y software. La **mecanización** controla una máquina o proceso con el uso de diferentes dispositivos mecánicos, hidráulicos, neumáticos o eléctricos; llegó a su máximo en la década de 1940. Sin embargo, a pesar de los beneficios obvios de las operaciones mecanizadas, el trabajador todavía estaba involucrado directamente en una operación en particular y verificaba continuamente el desempeño de una máquina. Considere, por ejemplo las siguientes situaciones:

- Una herramienta de corte se desgasta o fractura durante una operación de maquinado.
- Una parte se sobrecalienta durante su tratamiento térmico.
- El acabado de la superficie de una parte comienza a deteriorarse durante el rectificado.
- Las tolerancias dimensionales y la restitución se hacen demasiado grandes en el formado de láminas metálicas.

El operador tenía que intervenir en cada una de estas situaciones y cambiar uno o más de los parámetros del proceso y de la configuración de las máquinas relevantes, tarea que requería capacitación y experiencia considerables.

El siguiente paso en la mejora de la eficiencia de las operaciones de manufactura fue la **automatización**, palabra acuñada a mediados de la década de 1940 en la industria automotriz de Estados Unidos para indicar el **manejo y procesamiento automáticos de las partes** en y entre las máquinas de producción. La eficiencia se vio incrementada todavía más con los rápidos avances de la automatización y el desarrollo de varias tecnologías de soporte, sobre todo en los **sistemas de control**, con ayuda de computadoras y software cada vez más poderosos.

Este capítulo sigue la ruta ilustrada en la figura 37.1. Primero se revisan la historia y los principios de la automatización y cómo ha ayudado a *integrar* distintas operaciones

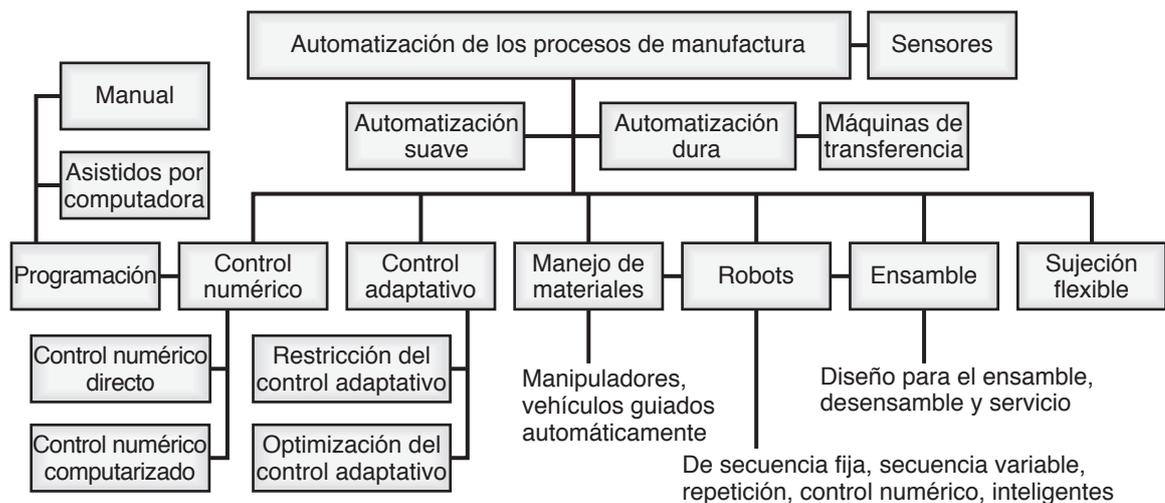


FIGURA 37.1 Panorama de los temas cubiertos en este capítulo.

clave en una planta de manufactura. Después se introduce el concepto del control de máquinas y sistemas por medio de técnicas de **control numérico** y **control adaptativo**. El capítulo también describe la manera en que se ha desarrollado la importante actividad del manejo y movimiento del material en varios sistemas, en particular aquellos que incluyen el uso de **robots industriales** para mejorar mucho la eficiencia en su manipulación.

Después se aborda el tema de la **tecnología de sensores**; éste es un elemento esencial para el control y optimización de maquinaria, procesos y sistemas. También se cubren los desarrollos significativos en cuanto a la **sujeción flexible** y **operaciones de ensamble**; estos métodos son cruciales en las tecnologías de manufactura avanzada, en particular de sistemas flexibles de manufactura. También se incluye un análisis del **diseño para el ensamble, desensamble y servicio**, con recomendaciones específicas para ayudar a mejorar la eficiencia de cada una de dichas operaciones. El tema final del capítulo es la economía del equipo, los procesos y operaciones de la manufactura.

37.2 Automatización

El término automatización, de la palabra griega *automatos* que significa “acción por sí mismo”, se define generalmente como el proceso de hacer que las máquinas sigan una secuencia predeterminada de operaciones con poca o ninguna intervención humana y con el uso de equipo y dispositivos especializados que realizan y controlan procesos y operaciones. La tabla 37.1 muestra el desarrollo histórico de la automatización. La automatización completa se logra por medio de diferentes dispositivos, sensores, actuadores,

TABLA 37.1

Historia de la automatización de los procesos de manufactura	
Fecha	Desarrollo
1500-1600	Fuerza hidráulica para el trabajo de metales; rodillos giratorios para acuñar monedas.
1600-1700	Tornos de mano para madera; calculadora mecánica.
1700-1800	Torno para mandrinar, torneear y hacer cuerdas de tornillos; taladro de banco.
1800-1900	Torno copiado, torno de torreta, fresadora universal; calculadoras mecánicas avanzadas.
1808	Tarjetas metálicas perforadas para el control automático de patrones de tejido en telares.
1863	Piano reproductor automático (pianola).
1900-1920	Torno de engranes; máquina automática para hacer tornillos; máquina automática para hacer botellas.
1920	Primer uso de la palabra robot.
1920-1940	Máquinas de transferencia; producción en masa.
1940	Primera máquina computadora electrónica.
1943	Primera computadora electrónica digital.
1945	Primer empleo de la palabra automatización.
1947	Invención del transistor.
1952	Primer prototipo de máquina herramienta de control numérico.
1954	Desarrollo del lenguaje simbólico APT (Automatically Programmed Tool); control adaptativo.
1957	Máquinas herramienta de control numérico comerciales.
1959	Circuitos integrados; primer uso del término tecnología de grupos.
(década de 1960)	Robots industriales.
1965	Circuitos integrados a gran escala.
1968	Controladores lógicos programables.
1970	Primer sistema integrado de manufactura; soldadura de punto de carrocerías automotrices con robots.
(década de 1970)	Microprocesadores; robot controlado por minicomputadora; sistemas flexibles de manufactura; tecnología de grupos.
(década de 1980)	Inteligencia artificial; robots inteligentes; sensores inteligentes; células de manufactura sin operador.
(décadas de 1990-2000)	Sistemas integrados de manufactura; máquinas inteligentes y basadas en sensores; redes de telecomunicaciones y de manufactura global; dispositivos de lógica difusa; redes neurales artificiales; herramientas de internet; ambientes virtuales; sistemas de información de alta velocidad.
(década de 2010)	Almacenamiento en la nube; MTConnect para recuperación de información; archivos geométricos tridimensionales; STEP-NC y código G autogenerado.

técnicas y equipos capaces de (a) monitorear todos los aspectos de la operación; (b) tomar decisiones sobre los cambios que deban hacerse y (c) controlar todos los aspectos de la operación. Los sistemas modernos también tienen la capacidad de almacenar datos sobre dichas actividades y comunicarlos a través de una red de computadoras o dispositivos de almacenamiento para su análisis.

La automatización es más un concepto *evolucionario* que revolucionario, y se ha implementado en especial en las siguientes áreas básicas de las actividades de manufactura:

- **Procesos de producción:** maquinado, forjado, extrusión en frío, fundido, metalurgia de polvos y operaciones de rectificado.
- **Manejo y movimiento de materiales:** los materiales y partes en diferentes etapas de procesamiento (llamados *trabajos en proceso*) se trasladan a través de la planta por equipo controlado por computadora, con poca o ninguna ayuda humana.
- **Inspección:** las partes se inspeccionan automáticamente para verificar su exactitud dimensional, acabado de superficies, calidad y diferentes características específicas durante su producción (*inspección en proceso*).
- **Ensamble:** las partes y componentes manufacturados de manera individual se ensamblan automáticamente en subensambles y después en ensambles hasta completar un producto.
- **Empaque:** los productos se empaquetan automáticamente para su envío.

37.2.1 Evolución de la automatización

Como se aprecia en la tabla I.2, algunos procesos de trabajo de metales ya se usaban en fecha tan temprana como 4000 a. C. Sin embargo, hasta el comienzo de la Revolución Industrial, en la década de 1750 (también conocida como *Primera Revolución Industrial*), fue que la automatización comenzó a ser introducida en la producción de bienes. La *Segunda Revolución Industrial* empezó a mediados de la década de 1950 con avances en diversas áreas.

Las máquinas herramienta, como tornos de torreta, máquinas automáticas para hacer tornillos y equipo automático para fabricar botellas de vidrio, comenzaron a desarrollarse a finales de la década de 1890. En la década de 1920 se desarrollaron técnicas de producción en masa y máquinas de transferencia, las cuales tenían mecanismos automáticos *fijos* y estaban diseñadas para producir partes *específicas*; su mejor representación estaba en la industria automotriz, la cual producía vehículos a grandes tasas y bajo costo; por ejemplo, a finales de la década de 1920 Ford fabricaba más de un automóvil por minuto y podía ser adquirido con facilidad por el obrero común.

El salto más grande en la automatización comenzó con el control numérico (NC, por sus siglas en inglés) de las máquinas herramienta a principios de la década de 1950 (vea la sección 37.3). A partir de ese histórico desarrollo tuvo lugar un progreso rápido en la automatización de casi todos los aspectos de la manufactura, desde la introducción de las computadoras en la automatización, el control numérico computarizado (CNC) y el control adaptativo (AC, por sus siglas en inglés), hasta los robots industriales, el diseño, la ingeniería y manufactura asistidos por computadora (CAD/CAE/CAM, por sus siglas en inglés) y los sistemas integrados de manufactura por computadora (CIM, por sus siglas en inglés).

Como se dijo en varios capítulos, la manufactura implica diferentes niveles de automatización, lo que depende de los procesos que se utilizan, los productos que se han de fabricar y los volúmenes de producción requeridos. Los sistemas de manufactura incluyen las clasificaciones siguientes, en orden creciente de automatización (vea también la figura 37.2):

- **Talleres:** estas instalaciones usan máquinas de propósito general y centros de maquinado con grandes niveles de uso de mano de obra.
- **Producción con NC independiente:** este método utiliza máquinas de control numérico, pero con una interacción significativa del operador con la máquina.

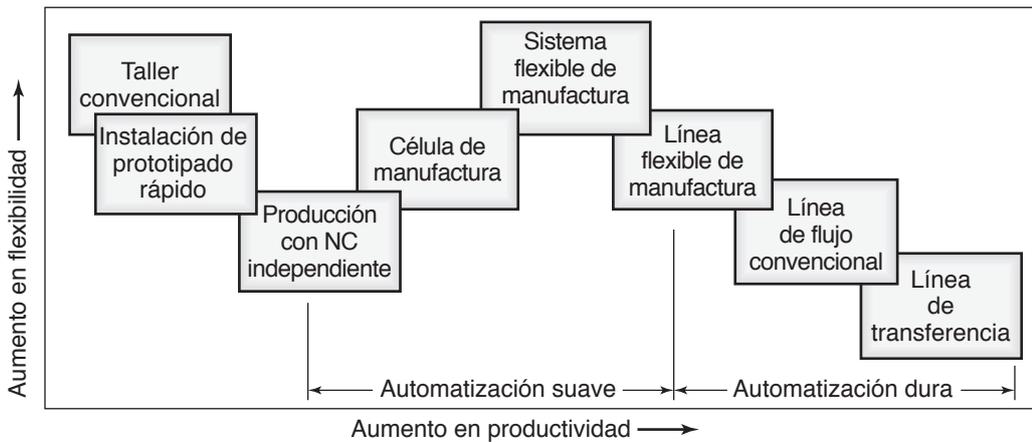


FIGURA 37.2 Flexibilidad y productividad de varios sistemas de manufactura; note el traslape entre los sistemas debido a los diferentes niveles de automatización y control computarizado que es posible tener en cada grupo (vea el capítulo 39 para más detalles).

- **Células de manufactura:** estas células usan un grupo de máquinas con control computarizado integrado y manejo flexible del material, con frecuencia por medio de robots industriales.
- **Sistemas flexibles de manufactura:** estos sistemas emplean el control por computadora de todos los aspectos de la manufactura, la incorporación simultánea de varias células de manufactura y sistemas automatizados de manejo de materiales.
- **Líneas flexibles de manufactura:** estas líneas comprenden maquinaria controlada por computadora organizada en líneas de producción en lugar de células. La transferencia de partes se hace con automatización dura y el flujo de productos es más limitado que en los sistemas de manufactura flexible, pero el rendimiento es mayor para cantidades de producción más altas.
- **Líneas de flujo y líneas de transferencia:** consisten en agrupamientos organizados de maquinaria con manejo automatizado de los materiales entre las máquinas. Debido a que la meta es producir sólo un tipo de parte, la línea de manufactura está diseñada con poca o ninguna flexibilidad.

37.2.2 Implementación de la automatización

Por lo general, la automatización tiene las siguientes metas principales:

- *Integrar* varios aspectos de las operaciones de manufactura para mejorar la calidad y uniformidad del producto, minimizar los ciclos de tiempo y el esfuerzo y reducir los costos de la mano de obra.
- *Mejorar la productividad* por medio de la reducción de los costos de manufactura a través de un mejor control de la producción; las partes se cargan, avanzan y descargan en las máquinas con más eficiencia; las máquinas se usan con mayor eficacia y la producción se organiza con más eficiencia.
- *Mejorar la calidad* con el uso de procesos más repetibles.
- *Reducir la injerencia humana*, el aburrimiento, y por tanto la posibilidad del error humano.
- *Reducir el daño a las piezas de trabajo* causado por el manejo manual de las partes.
- *Elevar el nivel de seguridad* del personal, en especial en condiciones peligrosas de trabajo.
- *Economizar el espacio de trabajo* en la planta con el reacomodo de las máquinas, del manejo y movimiento de materiales y equipo auxiliar con mayor eficiencia.

Automatización y cantidad de producción. La cantidad que se produce es crucial para determinar el tipo de maquinaria y el nivel de automatización requerido para producir

TABLA 37.2

Cantidades aproximadas de producción anual		
Tipo de producción	Número producido	Productos comunes
Experimental o prototipo	1-10	Todos los productos.
Por pieza o pequeños lotes	10-5000	Aviones, misiles, maquinaria especial, dados, joyería e implantes ortopédicos.
Lotes o grandes volúmenes	5000-100 000	Camiones, maquinaria agrícola, turbinas para aeronaves, motores diesel, componentes de computadora y artículos deportivos.
Producción en masa	100 000 y más	Automóviles, aparatos electrodomésticos, sujetadores y recipientes para comidas y bebidas.

partes de manera económica. La *cantidad total de producción* se define como el número total de partes por fabricar, en tanto que la *tasa de producción* es el número de partes producidas por unidad de tiempo. La cantidad de producción se fabrica en grupos de varios *tamaños de lote*. En la tabla 37.2 se presentan los rangos aproximados y generalmente aceptados de volúmenes de producción para algunas aplicaciones comunes. Observe que, como era de esperarse, los productos experimentales o prototipos representan el volumen más bajo (vea el capítulo 20).

Los **talleres** por lo común producen pequeñas cantidades por año (figura 37.2), usan varias máquinas herramienta estándar de propósito general (llamadas *máquinas independientes*) o *centros de maquinado* (capítulo 25). Las operaciones realizadas normalmente tienen una gran variedad de partes, lo que significa que se producen diferentes artículos en poco tiempo sin grandes cambios en las herramientas o en las operaciones. La maquinaria de los talleres por lo general requiere mano de obra capacitada para su operación y las cantidades y tasas de producción suelen ser bajas; como resultado, el costo de la producción por parte es elevado (figura 37.3). Cuando las partes implican un gran componente de mano de obra, la producción se llama *intensiva en mano de obra*.

La **manufactura digital** o *prototipado rápido* ha transformado de manera significativa la producción de bajos volúmenes. Junto con el desarrollo del software de computadora con la capacidad de hacer modelos geométricos tridimensionales, ahora pueden diseñarse y manufacturarse las partes de la pieza con menos esfuerzo y costo que antes. La habilidad del operador o programador aún es elevada, pero las instalaciones para hacer

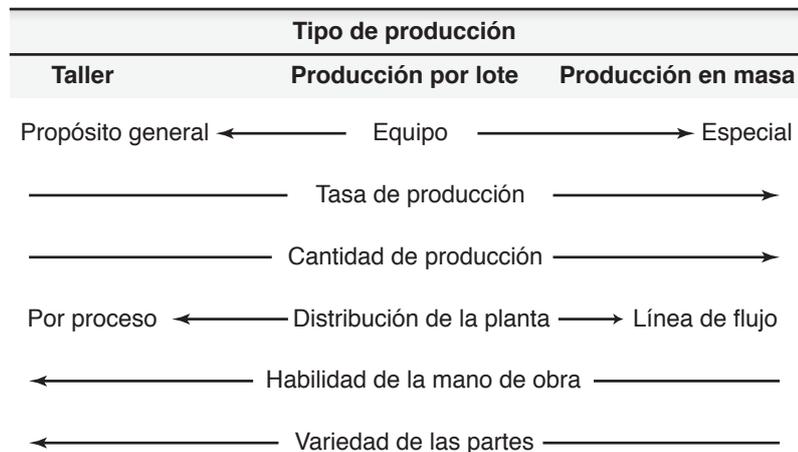


FIGURA 37.3 Características generales de tres tipos de métodos de producción: en un taller, por lote y en masa.

prototipos rápidos tienen casi la misma flexibilidad que los talleres y solamente las limita la cantidad de materiales que se pueden procesar con eficacia.

- **Producción por pieza o parte**, que por lo general comprende cantidades muy pequeñas y es apropiada para los talleres; la mayoría de la producción por pieza o parte se realiza en tamaños de lote de 50 artículos o menos.
- **Producción en pequeños lotes**, donde las cantidades por lo común están en el rango de 10 a 100; el equipo consiste en máquinas de propósito general y centros de maquinado.
- **Producción por lotes**, implica en general tamaños de lote de 100 a 5000; la maquinaria es semejante a la que se utiliza para la producción en pequeños lotes pero con accesorios de diseño especial para tener una productividad más alta.
- **Producción en masa**, en la cual por lo común las cantidades son mayores que 100 000. Requiere maquinaria de propósito especial, llamada **máquinas dedicadas**, y equipo automatizado para la transferencia de materiales y partes en proceso. Estos sistemas de producción están organizados por tipo específico de producto; en consecuencia, carecen de flexibilidad. Aunque la maquinaria, equipo y herramientas especiales son caros, tanto la habilidad de la mano de obra como sus costos son relativamente bajos.

37.2.3 Aplicaciones de la automatización

La automatización se puede aplicar en la manufactura de todo tipo de artículos, desde materias primas hasta productos terminados y en todo tipo de producción, desde talleres hasta grandes instalaciones manufactureras. La decisión de automatizar una instalación nueva o ya existente incluye considerar lo siguiente:

- Tipo de producto por manufacturar.
- Cantidad y tasa de producción que se requiere tener.
- Fase particular de la operación de manufactura que se va a automatizar, si es que no se hará en todas las fases.
- Nivel de habilidad existente en la fuerza laboral.
- Problemas de confiabilidad y mantenimiento asociados con la maquinaria y los sistemas automatizados.
- Economía de la operación en su conjunto.

Debido a que la automatización por lo general involucra un alto costo inicial del equipo y requiere el conocimiento de los principios de operación y mantenimiento, la decisión de implementar incluso niveles bajos de automatización debe comprender un estudio cuidadoso de las necesidades reales de una organización. En algunas situaciones es deseable la **automatización selectiva** en vez de la automatización total. Como se estudia en el resto del libro, hay varios aspectos importantes y complejos involucrados en la toma de decisiones acerca del nivel apropiado de automatización. Por lo general, si una instalación de manufactura ya está automatizada, el nivel de habilidad que se requiere del operador es menor.

Por otro lado, la aplicación de computadoras y maquinaria controlada por éstas en el ambiente de manufactura requiere un nivel más alto de sofisticación de la fuerza de trabajo que el necesario para la automatización dura. Asimismo, la automatización requiere mayor habilidad en el mantenimiento y puesta a punto de los trabajadores empleados. Entonces, debe reconocerse que ahora las habilidades y atributos de la fuerza de trabajo de una planta son diferentes y están relacionados con el nivel de automatización que se quiere alcanzar.

37.2.4 Automatización dura

En la *automatización dura*, también llamada **automatización de posición fija**, las máquinas están diseñadas para producir un artículo estándar, como un engrane, eje o mono-

block de motor. Aunque se pueden modificar el tamaño del producto y los parámetros de procesamiento, como velocidad de la máquina, avance y profundidad del corte, estas máquinas son especializadas y por ello carecen de flexibilidad.

Debido a que el diseño y la construcción de las máquinas son caros, su uso rentable requiere la producción de partes en cantidades muy grandes; por ejemplo, motores de automóvil. Las máquinas, generalmente llamadas *máquinas de transferencia*, consisten en *unidades de producción con cabezal de potencia y mecanismos de transferencia* construidos con base en el **principio modular (bloques universales)**; vea también la sección 25.2.4.

Unidades de producción con cabezal de potencia. Consisten en un marco o bancada, motores eléctricos, cajas de cambios y husillos de herramientas y son autocontenidas; sus componentes existen en el comercio en varios tamaños y capacidades estándar. Debido a esta modularidad inherente y a su adaptabilidad y flexibilidad, se pueden reagrupar con facilidad para producir una parte distinta.

Máquinas de transferencia. En general consisten en dos o más unidades con cabezal de potencia y es posible disponerlas en el taller en patrones lineales, circulares o en forma de U. Las máquinas de transferencia también se emplean mucho en el ensamble automatizado, como se describe en la sección 37.9. Los *mecanismos de transferencia* se usan para mover la pieza de trabajo de una estación a otra en la máquina, o de una máquina a otra, con el fin de permitir que se realicen varias operaciones en la parte. Las piezas de trabajo se transfieren por métodos como (a) rieles, que se accionan con varios mecanismos junto con las partes (por lo general colocadas en pallets o tarimas (figura 37.4a)); (b) tarimas giratorias indexables (figura 37.4b) y (c) transportadores elevados.

Líneas de transferencia. La figura 37.5 muestra una *línea de transferencia* o *línea de flujo*; observe la variedad de operaciones que se ejecutan. Un ejemplo común de línea de transferencia grande es el de la producción del monoblock del motor de un automóvil, que consiste en numerosas operaciones de maquinado a altas tasas. El peso y la forma de las piezas de trabajo influyen en el acomodo de las máquinas individuales, lo que es importante para la continuidad de la operación en caso de falla de la herramienta o descompostura de la máquina en una o más de las unidades. A las máquinas se les incorporan características de *almacenamiento intermedio* para permitir que la operación continúe en tal caso.

La transferencia de las partes de una estación a otra por lo general se controla con sensores y otros dispositivos. Las herramientas en las máquinas se cambian con facilidad usando portaherramientas con *características de cambio rápido*. Las máquinas están equipadas con diferentes sistemas de medición e inspección automáticas, lo que asegura que las dimensiones de la parte producida en una estación estén dentro de las tolerancias aceptables antes de que la parte se transfiera a la estación siguiente de la línea.

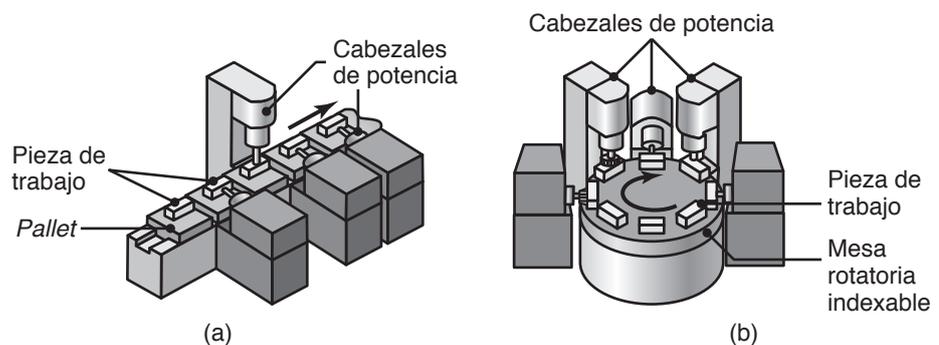


FIGURA 37.4 Dos tipos de mecanismos de transferencia: (a) rieles rectos y (b) circulares o rotatorios.

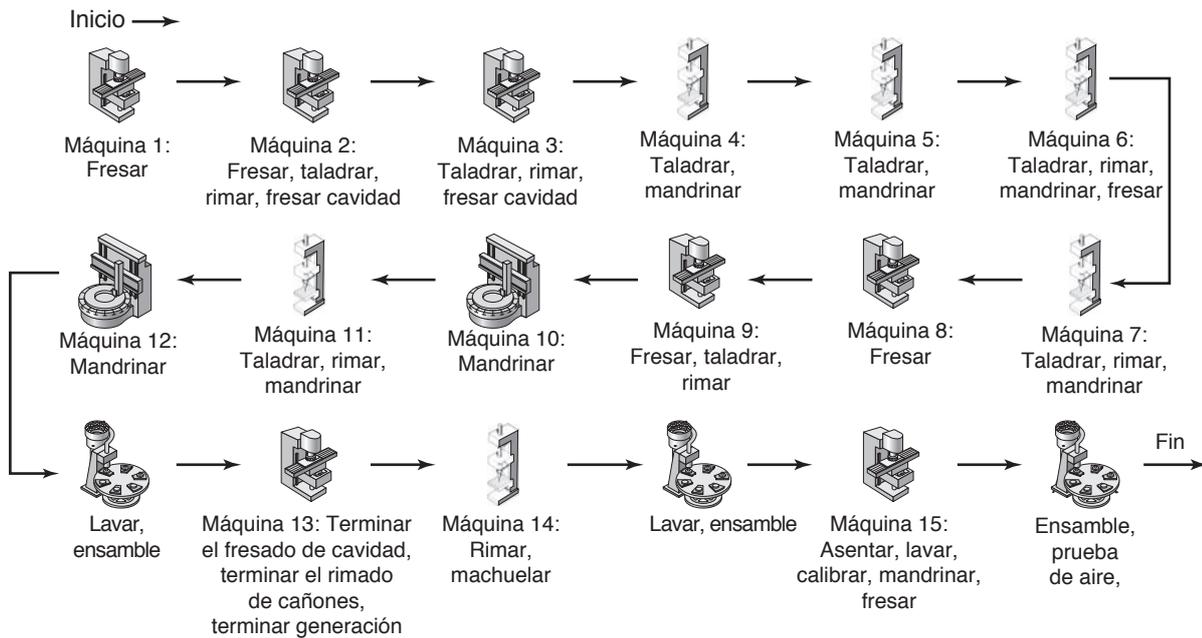


FIGURA 37.5 Ilustración esquemática de una línea de transferencia.

37.2.5 Automatización suave

Recuerde que la automatización dura por lo general involucra máquinas de producción masiva que carecen de flexibilidad. Con la *automatización suave*, también llamada **flexible** o **programable**, se logra una mayor flexibilidad a través del uso del control computarizado de la máquina y de sus funciones; de ese modo, la automatización suave produce partes de formas complejas. Las máquinas se reprograman con facilidad para manufacturar partes con forma o dimensiones diferentes de la fabricada justo antes. Los avances en la automatización suave incluyen el amplio uso de computadoras modernas, lo que conduce al desarrollo de **sistemas flexibles de manufactura** con altos niveles de eficiencia y productividad (sección 39.3).

37.2.6 Controladores lógicos programables

El control de un proceso de producción en la secuencia apropiada de operaciones, en especial si involucra grupos de máquinas y equipo de manejo de materiales, se ha ejecutado tradicionalmente por medio de interruptores, relevadores, cronómetros, contadores y dispositivos de hardware similares que se basan en principios mecánicos, electromecánicos y neumáticos.

A principios de 1968 comenzaron a introducirse los *controladores lógicos programables* (PLC, por sus siglas en inglés) para reemplazar a los dispositivos de hardware. Debido a que los PLC eliminan la necesidad de paneles de control con relevadores y a que se pueden reprogramar y requieren menos espacio, se han adoptado ampliamente en los sistemas y operaciones de manufactura. Sus funciones básicas son (a) encendido y apagado; (b) movimiento; (c) operaciones secuenciales y (d) control de retroalimentación. Estos controladores se desempeñan de manera confiable en ambientes industriales y mejoran la eficiencia conjunta de una operación. Aunque ya son menos comunes en las instalaciones nuevas (debido a los avances en las máquinas de control numérico), los PLC todavía representan una gran parte de la base de las instalaciones. Su popularidad continua se debe a su bajo costo y a la proliferación de software poderoso que permite programarlos desde computadoras personales, las cuales cargan los programas de control a través de Ethernet o comunicaciones inalámbricas.

Con frecuencia, los modernos controladores lógicos programables están programados en versiones especializadas de los lenguajes BASIC o C. Ahora se emplean con más

frecuencia *microcomputadoras* debido a que son menos caras y más fáciles de programar y colocar en red. Los PLC también se usan en el control de sistemas con capacidades de procesamiento digital y comunicación a gran velocidad.

37.2.7 Mantenimiento total productivo y administración total del equipo productivo

La administración y el mantenimiento de una gran variedad de máquinas, equipos y sistemas se encuentran entre los aspectos importantes que afectan la productividad en una organización de manufactura. Los conceptos de *mantenimiento total productivo* (TPM, por sus siglas en inglés) y *administración total del equipo productivo* (TPEM, por sus siglas en inglés) incluyen el análisis continuo de factores como:

- Fallas y problemas del equipo.
- Monitoreo y mejora de la productividad del equipo.
- Implementación del mantenimiento preventivo y predictivo.
- Reducción del tiempo de puesta a punto, tiempo ocioso y duración del ciclo.
- Utilización total de la maquinaria y el equipo y mejora de su eficacia.
- Reducción de los defectos en el producto.

Como era de esperar, el *trabajo en equipo* es un componente importante de esta actividad e implica la plena cooperación de los operadores de las máquinas, personal de mantenimiento, ingenieros y la administración de la organización (vea también *kaizen*, sección 36.1).

37.3 Control numérico

El *control numérico* (NC) es un método para controlar los movimientos de los componentes de las máquinas por la inserción directa al sistema de instrucciones codificadas. El sistema interpreta luego automáticamente dichos datos y los convierte en señales de salida que a su vez controlan diferentes componentes de máquina como encender y apagar husillos giratorios, cambiar herramientas, mover la pieza de trabajo o las herramientas a lo largo de trayectorias específicas y activar o desactivar los fluidos de corte.

La importancia del control numérico en la manufactura se ilustra con el ejemplo siguiente: suponga que se deben perforar varios barrenos en una parte, en las posiciones que se indican en la figura 37.6. En el

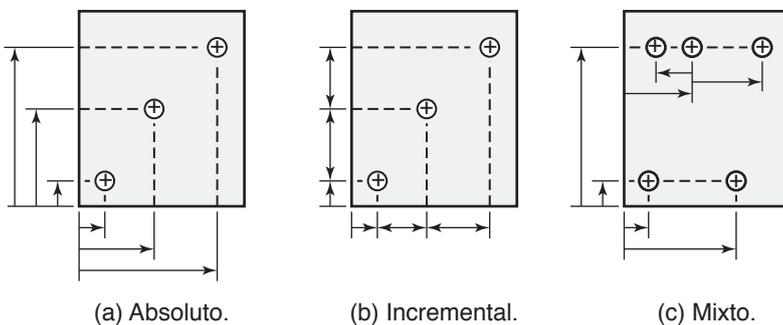


FIGURA 37.6 Posiciones de los barrenos taladrados en una pieza de trabajo. Se ilustran tres métodos para hacer las mediciones: (a) dimensionamiento absoluto, con referencia a un punto en la parte baja de la izquierda de la pieza; (b) dimensionamiento incremental, hecho secuencialmente de un barreno a otro y (c) dimensionamiento mixto, que es una combinación de ambos métodos.

método tradicional manual de trabajo para maquinar esta parte, el operador posiciona la broca con respecto a la pieza de trabajo (vea la figura 23.25) usando puntos de referencia dados por cualquiera de los tres métodos que aparecen en la figura; entonces el operador procede a taladrarlos.

Ahora suponga que se han de perforar 100 partes, todas exactamente de la misma forma y exactitud dimensional. Es obvio que esta operación va a ser tediosa y lenta porque el operador tiene que ejecutar repetidamente los mismos movimientos. Además, hay una alta probabilidad, por diferentes razones, de que algunas de las partes taladradas sean diferentes de las demás.

Además, suponga que durante esta corrida de producción se cambia el orden de procesamiento de las partes y que 10 de ellas ahora requieren barrenos en posiciones diferentes. El operador ahora tiene que reposicionar la mesa de trabajo, operación lenta y susceptible a errores. Dichas operaciones se pueden ejecutar con facilidad en máquinas de control numérico (vea la figura 23.26) capaces de producir partes en forma repetida y exacta y de manejar diferentes partes con sólo cargar diferentes programas de partes.

En las operaciones de control numérico se guardan en discos duros los datos concernientes a todos los aspectos de la operación de maquinado, como ubicaciones de la herramienta, velocidades, avances y fluidos de corte. Con base en la información de entrada, los relevadores y otros dispositivos, conocidos como *controles de hardware*, actúan para obtener la preparación deseada de la máquina. Ahora se ejecutan fácilmente operaciones complejas, como torneado una parte que tiene varios contornos o tallar un relieve en una fresadora. Las máquinas de control numérico se usan ampliamente en cantidades pequeñas y medianas de producción (por lo general 500 artículos o menos) de una gran variedad de partes, tanto en talleres como en instalaciones de manufactura.

EJEMPLO 37.1 Origen histórico del control numérico

El concepto básico tras el control numérico parece haberse implementado a principios de la década de 1800, cuando se usaban tarjetas de metal perforadas para controlar automáticamente los movimientos de los telares. Las agujas se activaban al detectar si había o no una perforación en la tarjeta. A esta invención le siguieron los pianos automáticos (*pianolas*), en los cuales las teclas se activaban por el aire que fluía a través de orificios hechos en un rollo de papel perforado.

El principio de controlar numéricamente los movimientos de las máquinas herramienta lo concibió por primera vez J. T. Parsons (1913-2007), inventor estadounidense, en la década de 1940, en un intento de maquinar aspas complejas de helicópteros. El prototipo de máquina NC se construyó en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), fue una fresadora de co-

piado de dos ejes y husillo vertical con servomotores; las operaciones de maquinado consistían en fresado de acabado y refrentado (capítulo 24) en una placa gruesa de aluminio.

Los datos numéricos, perforados en cinta de papel, se generaban con una computadora digital (otro invento que se desarrolló al mismo tiempo en el MIT). En los primeros experimentos las partes se maquinaron con éxito, de manera exacta y repetida, sin intervención de ningún operador. Con base en este éxito, la industria de las máquinas herramienta comenzó a diseñar, construir y comercializar equipos de control numérico. Después, éstos fueron equipados con controles numéricos computarizados de gran flexibilidad, exactitud, versatilidad y facilidad de operación.

37.3.1 Control numérico computarizado

En la siguiente etapa de desarrollo del control numérico, el control con hardware (montado en la máquina de NC) se convirtió en control local computarizado por medio de software.

- En el **control numérico directo** (DNC, por sus siglas en inglés) varias máquinas eran controladas directamente (paso a paso) por una computadora central. En este sistema, el operador tenía acceso a la computadora por medio de una terminal remota. Con el DNC se podía monitorear y evaluar el estado de *todas* las máquinas en una instalación de manufactura desde una computadora central. Sin embargo, el DNC tenía la desventaja fundamental de que si la computadora central fallaba por alguna razón, todas las máquinas quedaban inoperantes.
- En el **control numérico distribuido**, una computadora central sirve como sistema de control de cierto número de máquinas de CNC individuales que tienen microcomputadoras incorporadas. Este método fue valioso cuando las computadoras no tenían suficiente memoria para guardar todos los datos de las operaciones de maquinado esenciales para producir una parte. El control numérico directo se

hizo menos popular en la década de 1990, aunque aún es común el empleo de una computadora central para obtener, almacenar y analizar datos. Un avance reciente es el uso del **almacenamiento en la nube**, en el que los archivos se guardan en servidores de una tercera compañía y se accede a ellos por medio de herramientas de internet cuando se necesitan.

- El **control numérico computarizado (CNC)** es un sistema en el que una microcomputadora de control es parte integral de la máquina (*computadora de a bordo*). El operador de la máquina programa estas computadoras, modifica los programas directamente, prepara programas para diferentes partes y los almacena. Actualmente los sistemas CNC tienen un amplio uso debido a la disponibilidad de (a) computadoras pequeñas con mucha memoria; (b) bajo costo de controladores y microprocesadores programables y (c) capacidades de editar programas.

37.3.2 Principios de las máquinas de control numérico

En la figura 37.7 se muestran los elementos y operación básicos de una máquina común de NC. Los elementos funcionales en el control numérico y los componentes involucrados son los siguientes:

- **Entrada de datos:** la información numérica se lee y guarda en la memoria de la computadora.
- **Procesamiento de datos:** los programas se leen en la unidad de control de la máquina para su procesamiento.
- **Salida de datos:** esta información se traduce a comandos (lo normal es que sean comandos pulsados) para el servomotor (figura 37.8). Con ellos, el servomotor mueve la mesa de trabajo a posiciones específicas con movimientos lineales o rotatorios por medio de motores de pasos, husillos u otros dispositivos similares.

Tipos de circuitos de control. Una máquina de control numérico se controla con dos tipos de circuitos. En el sistema de **lazo abierto** (figura 37.8a), las señales son enviadas por el controlador al servomotor, pero no se revisa la exactitud de los movimientos y posiciones finales de la mesa de trabajo. En contraste, el sistema de **lazo cerrado** (figura 37.8b) está equipado con varios transductores, sensores y contadores que miden exactamente la posición de la mesa de trabajo. A través del *control por retroalimentación* se compara la posición de la mesa de trabajo contra la señal; los movimientos de la mesa terminan cuando se alcanzan las coordenadas apropiadas.

La **medición de la posición** en las máquinas de control numérico se lleva a cabo con dos métodos (figura 37.9). En los *sistemas de medición indirecta*, *encoders rotatorios* o *reductores*, un movimiento rotatorio se convierte en un movimiento de traslación. Sin embargo, el backlash o juego (holgura entre los dientes de dos engranes adyacentes acoplados) puede afectar significativamente la exactitud de la medición. Los mecanismos para posicionar con retroalimentación utilizan varios sensores que se basan sobre todo en principios magnéticos y fotoeléctricos. En los *sistemas de medición directa*, un sensor lee una escala graduada en la mesa de la máquina, o corredera, para el movimiento lineal (figura 37.9c). Este sistema es más exacto porque la escala está construida en la máquina, por lo que el backlash en los mecanismos no es importante.

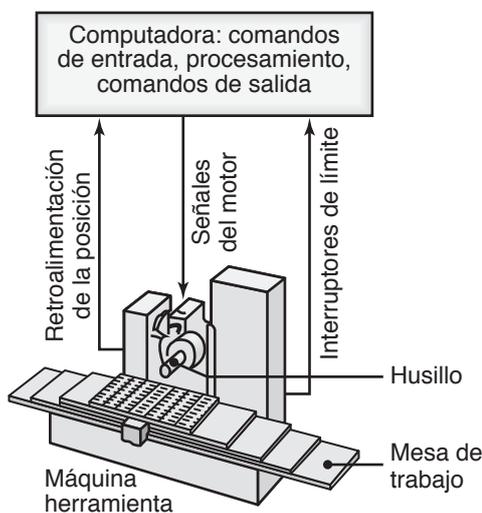


FIGURA 37.7 Ilustración esquemática de los principales componentes utilizados para el control de la posición en una máquina herramienta de control numérico.

37.3.3 Tipos de sistemas de control

En el control numérico hay dos tipos básicos de sistemas de control:

1. En un **sistema punto a punto**, también llamado *sistema de posicionamiento*, cada eje de la máquina es movido por separado por medio de husillos y a diferentes velocidades, lo que depende del tipo de operación. Al principio, la máquina se mueve a máxima velocidad con el fin de reducir el tiempo no productivo, pero luego

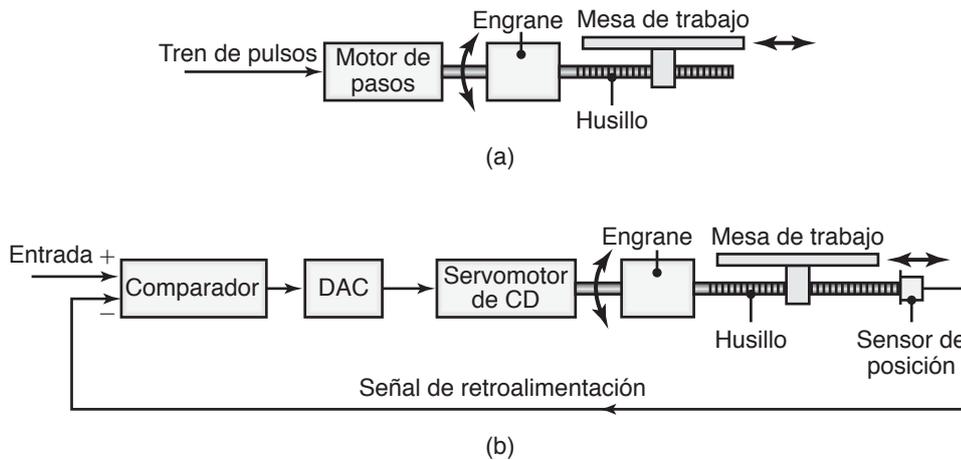


FIGURA 37.8 Ilustración esquemática de los componentes de un sistema de control de (a) lazo abierto y (b) lazo cerrado para una máquina de control numérico. DAC significa convertidor digital a analógico.

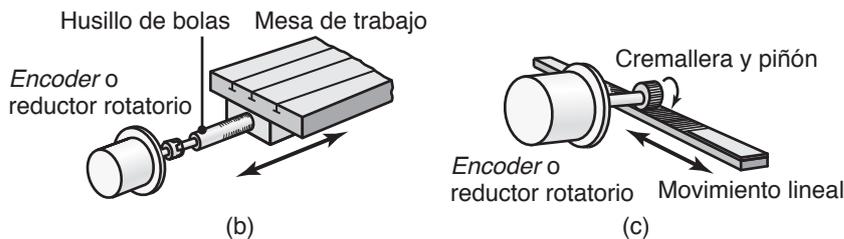
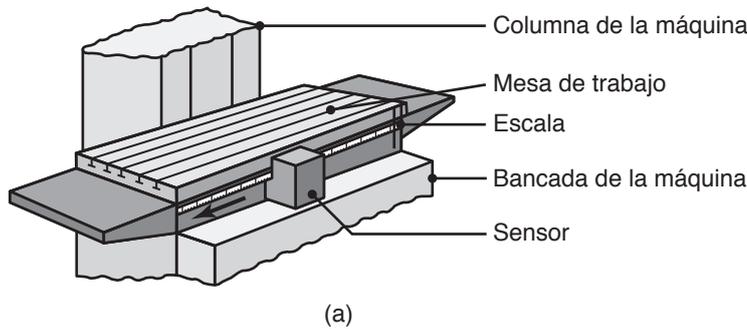


FIGURA 37.9 (a) Medición directa del desplazamiento lineal de la mesa de trabajo de una máquina herramienta; (b) y (c) métodos de medición indirecta.

desacelera conforme la herramienta se aproxima a su posición definida numéricamente. De modo que en una operación como la de perforar un barreno, el posicionamiento y taladrado tienen lugar en forma *secuencial* (figura 37.10a).

Una vez perforado el barreno, la herramienta se retrae y mueve con rapidez a otra posición especificada, y se repite la operación. La trayectoria seguida por la herramienta desde una posición a otra es importante sólo en un aspecto: debe elegirse para minimizar el tiempo de recorrido con el fin de lograr la mejor eficiencia. Los sistemas punto a punto se usan sobre todo para operaciones de taladrado, punzonado y fresado recto.

2. En un **sistema de contorno**, también conocido como *sistema de trayectoria continua*, tanto el posicionamiento como las operaciones se ejecutan a lo largo de trayectorias controladas, pero a diferentes velocidades. Debido a que la herramienta

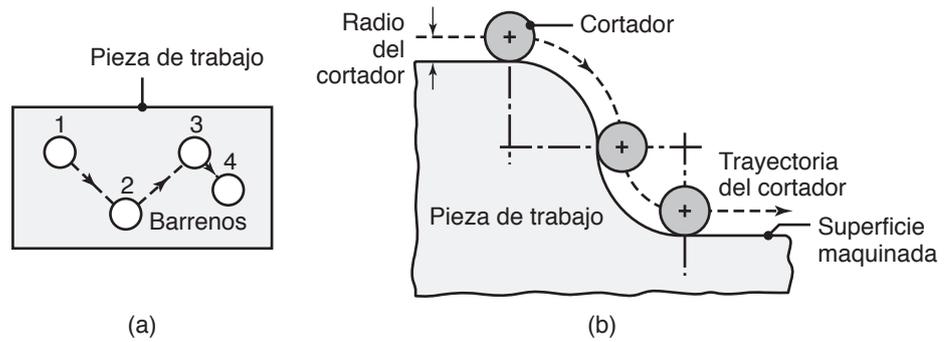


FIGURA 37.10 Movimiento de herramientas de corte en el maquinado de control numérico. (a) Punto a punto, en el que la broca perfora un barreno en la posición 1, se retrae y avanza a la posición 2, y así sucesivamente. (b) Trayectoria continua de una fresa; note que la trayectoria de ésta se compensa con respecto a su radio. La trayectoria también se compensa por el desgaste del cortador.

corta conforme se mueve a lo largo de una trayectoria prescrita (figura 37.10b), para lograr la exactitud son importantes el control y la sincronización de las velocidades y los movimientos. El sistema de contorno se usa normalmente en tornos, fresadoras, rectificadoras, maquinaria de soldadura y centros de maquinado.

Interpolación. El movimiento de la herramienta a lo largo de una trayectoria (*interpolación*) ocurre de manera incremental, por medio de uno de varios métodos básicos (figura 37.11). En la figura 37.12 se muestran ejemplos de trayectorias reales en operaciones de taladrado, mandrinado y fresado. En todas las interpolaciones la trayectoria controlada es la del *centro de rotación* de la herramienta. Sin embargo, durante el maquinado también puede hacerse alguna compensación en el programa de NC para diferentes tipos de herramientas, distintos diámetros de éstas o por desgaste.

- **Interpolación lineal.** La herramienta se mueve en línea recta de principio a fin (figura 37.11a) a lo largo de dos o tres ejes. Aunque en teoría con este método se puede producir todo tipo de perfiles, mediante pequeños incrementos entre los puntos (figura 37.11b), para lograrlo debe procesarse una gran cantidad de datos.
- **Interpolación circular** (figura 37.11c). Las entradas requeridas para la trayectoria son las coordenadas de los puntos extremos, las del centro del círculo y su radio, y la dirección del recorrido de la herramienta a lo largo del arco.
- **Interpolación parabólica y cúbica.** La trayectoria de la herramienta es aproximada por medio de curvas con base en ecuaciones matemáticas de orden superior. Este método es eficaz en máquinas de cinco ejes y es útil para operaciones de troquelado en relieve, como los dados para formar las láminas de carrocerías automotrices.

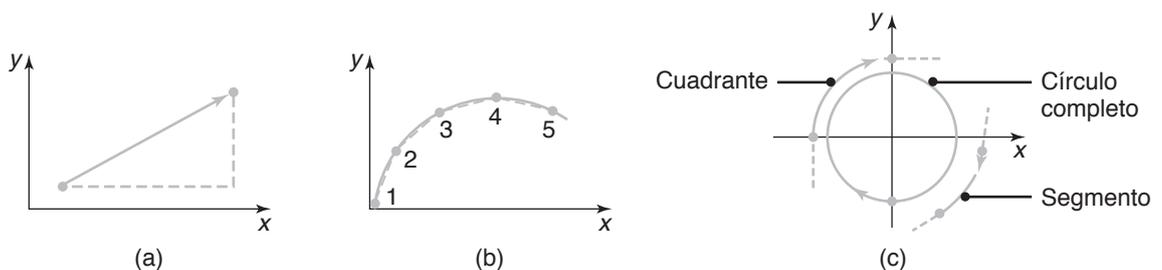


FIGURA 37.11 Tipos de interpolación en el control numérico: trayectoria (a) lineal, (b) continua, aproximada por líneas rectas incrementales, y (c) circular.

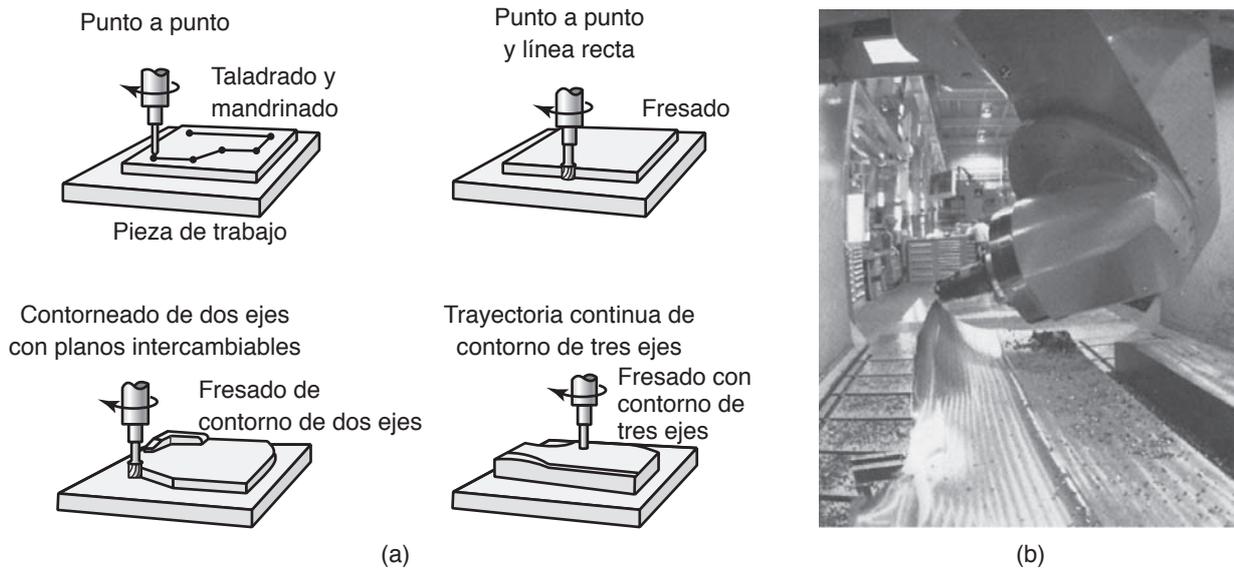


FIGURA 37.12 (a) Ilustración esquemática del taladrado, mandrinado y fresado a lo largo de diferentes trayectorias. (b) Maquinado de una superficie esculpida en una máquina herramienta de control numérico de cinco ejes. Fuente: Cortesía de The Ingersoll Milling Machine Co.

Las interpolaciones también se utilizan para coordinar los movimientos de robots industriales (sección 37.6).

37.3.4 Exactitud del posicionamiento en el control numérico

En las máquinas de control numérico, la *exactitud del posicionamiento* se define como lo exacto que puede posicionarse la máquina con respecto a un determinado sistema de coordenadas. La *exactitud de repetición* (repetibilidad) se define como la cercanía de la concordancia de la posición de los movimientos repetidos en las mismas condiciones de operación de la máquina. La *resolución*, también llamada *sensibilidad*, es el incremento más pequeño del movimiento de los componentes de la máquina (vea también la sección 35.7).

La *rigidez* de la máquina herramienta y el *backlash* en los engranes impulsores y husillos son factores importantes para el logro de la exactitud dimensional. El backlash en las máquinas modernas se elimina utilizando husillos precargados. Asimismo, la respuesta rápida a las señales de comandos requiere que se minimicen la fricción y la inercia en los deslizamientos de las máquinas. Esto último se consigue con la reducción de masa de los componentes de la máquina en movimiento, como por ejemplo empleando materiales ligeros, incluso cerámicos (vea también la sección 25.3).

37.3.5 Ventajas y limitaciones del control numérico

Con respecto a los métodos convencionales del control de la máquina, el control numérico tiene las siguientes ventajas:

- Mayor flexibilidad de operación, así como la capacidad de producir formas complejas con buena exactitud dimensional y posibilidad de repetición; altas tasas de producción, productividad y calidad del producto y menos desperdicio.
- Es fácil hacer ajustes en la máquina.
- Se pueden realizar más operaciones en cada corrida y el tiempo requerido para preparar y maquinar es menor que el requerido en los métodos convencionales.

- Los programas pueden ser preparados con rapidez y se pueden recuperar en cualquier momento.
- La habilidad requerida del operador es menor que para un maquinista calificado y el operador tiene más tiempo de atender otras tareas en el área de trabajo.

Las principales limitaciones del control numérico son (a) el costo inicial relativamente alto del equipo; (b) la necesidad y el costo de la programación y (c) el mantenimiento especial que se requiere.

37.3.6 Programación para el control numérico

Un *programa* para el control numérico consiste en una secuencia de instrucciones que hace que una máquina de NC ejecute cierta operación; las operaciones de maquinado de todas las formas son las que se aplican más comúnmente. La *programación para el NC* puede ser:

- Realizada por software de computadora, como *generadores de código G*, que producen código numérico a partir de archivos de datos geométricos; este software ahora es muy común, con numerosos códigos abiertos disponibles.
- Hecha en el taller (cambios raros aunque pequeños del código G).
- Comprada a un proveedor externo.

El programa contiene las instrucciones y comandos siguientes:

1. *Instrucciones geométricas* pertinentes a los movimientos relativos entre la herramienta y la pieza de trabajo.
2. *Instrucciones de procesamiento* relacionadas con las velocidades del husillo, avances, herramientas de corte, fluidos de corte, etcétera.
3. *Instrucciones del recorrido* acerca del tipo de interpolación y la velocidad del movimiento de la herramienta o la mesa de trabajo.
4. *Instrucciones de encendido* de las posiciones para el suministro de refrigerante, dirección o ausencia de rotación del husillo, cambios de herramienta, avance de la pieza de trabajo, sujeción, etcétera.

La *programación de la pieza asistida por computadora* comprende *lenguajes de programación simbólicos* especiales que determinan puntos de coordenadas como esquinas, aristas y superficies de la parte. Un **lenguaje de programación** es un medio de comunicación con la computadora e implica el uso de caracteres simbólicos. El programador describe el componente que se va a procesar y la computadora convierte esa descripción en comandos para la máquina de control numérico. Existen en el comercio varios lenguajes y son específicos para el fabricante. Los programas para la programación de partes se conocen como macros y son parecidos al lenguaje de programación BASIC.

Las partes complejas se pueden maquinar con el uso de programas de maquinado basados en gráficas y asistidos por computadora. Los lenguajes estándar de programación, como STEP-NC, y los más antiguos pero todavía comunes como el Código G se usan para comunicar instrucciones de maquinado al hardware de control numérico computarizado.

El software STEP-NC es un lenguaje estandarizado que se ha extendido más allá de las máquinas herramienta e incorpora modelos para fresar, torneear y EDM. También se han desarrollado sistemas de corte con plasma y soldadura láser para usarlos con STEP-NC.

37.4 Control adaptativo

El *control adaptativo* (AC) es básicamente un sistema de *retroalimentación dinámica* en el cual los parámetros de operación se adaptan de manera automática por sí mismos a las nuevas circunstancias; por tanto es una extensión lógica de los sistemas compu-

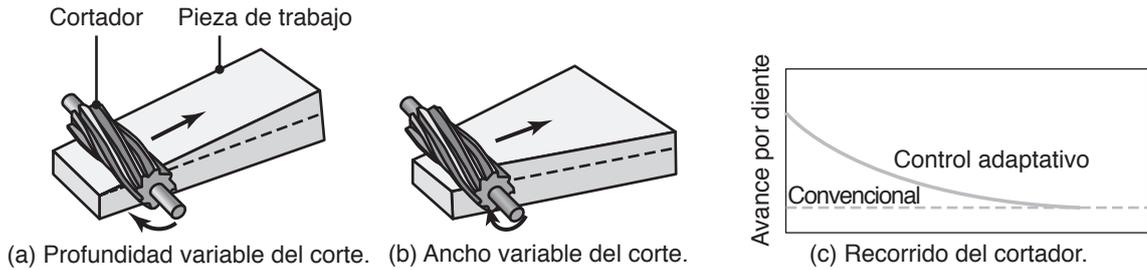


FIGURA 37.14 Ejemplo de control adaptativo en el fresado; a medida que la profundidad de corte (a) o el ancho del corte (b) se incrementan, aumentan las fuerzas de corte y el torque. El sistema percibe este incremento y reduce automáticamente el avance (c) para evitar fuerzas excesivas o la rotura de la herramienta con el fin de mantener la eficiencia del corte. Fuente: Basado en Y. Koren.

ción (ACC, por sus siglas en inglés). Así, por ejemplo, si la fuerza de corte (y por tanto el torque) se incrementa en exceso (debido a, digamos, la presencia de una región dura en un fundido), el sistema modifica la velocidad de corte o el avance, según sea necesario, con el fin de disminuir la fuerza de corte a un nivel aceptable (figura 37.14).

Sin el control adaptativo o la intervención directa del operador (como ha sido el caso en las operaciones de maquinado tradicional), las grandes fuerzas de corte causarían la falla de la herramienta o que la pieza de trabajo se flexionara o distorsionara en exceso. Como resultado, la exactitud dimensional y el acabado de la superficie comienzan a deteriorarse. Los sistemas que optimizan una operación se llaman **optimización por control adaptativo** (ACO, por sus siglas en inglés). La optimización puede, por ejemplo, procurar que se maximice la tasa de remoción de material entre los cambios de herramienta o mejorar el acabado de la superficie de la parte.

El *tiempo de respuesta* debe ser corto para que el AC sea efectivo, en particular en las operaciones de maquinado de alta velocidad (sección 25.5). Por ejemplo, suponga que una operación de torneado se realiza en un torno con una velocidad del husillo de 1000 rpm y que súbitamente se rompe la herramienta, lo que perjudica el acabado de la superficie y la exactitud dimensional de la parte. Es obvio que para que el sistema de AC sea eficaz, los sensores deben responder en un tiempo muy corto; de otra manera el daño para la pieza de trabajo sería grande.

Por tanto, en el control adaptativo, deben establecerse relaciones *cuantitativas* y codificarse en el software de la computadora como modelos matemáticos. Si, por ejemplo, la tasa de desgaste de la herramienta en una operación de maquinado fuera excesiva (sección 21.5), la computadora debe ser capaz de (a) calcular cuánto es necesario cambiar la velocidad o el avance y (b) decidir si aumenta o disminuye la velocidad del avance con el fin de reducir la tasa de desgaste a un nivel aceptable. El sistema también debe poder compensar los cambios dimensionales de la pieza de trabajo debido a factores como desgaste de la herramienta y aumento de temperatura (figura 37.15).

Es evidente que, acoplado con el CNC, el control adaptativo es una herramienta poderosa para optimizar las operaciones de manufactura. A pesar de que tiene grandes y demostrables beneficios con respecto a la calidad y productividad, a la fecha no se ha aplicado mucho. La mayoría de los sistemas de control de máquinas herramienta están basados en la geometría y no incorporan el control adaptativo. No obstante, las últimas versiones de los lenguajes de programación STEP-NC permiten el manejo de la deflexión y el desgaste.

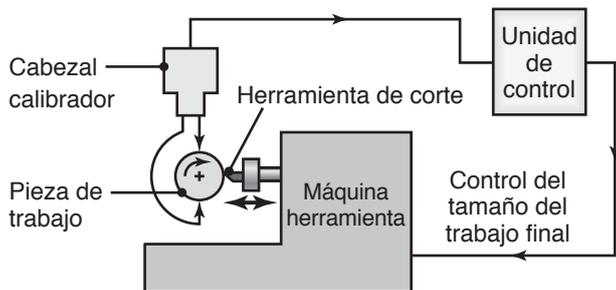


FIGURA 37.15 Inspección del proceso durante la realización del diámetro de una pieza de trabajo en una operación de torneado; el sistema ajusta automáticamente la posición radial de la herramienta de corte con el fin de producir el diámetro correcto.

37.5 Manejo y movimiento de materiales

Durante una operación normal de manufactura, las materias primas y las partes en proceso se desplazan desde el almacén hasta las máquinas, de máquina a máquina, del ensamble al inventario y por último al envío. Por ejemplo, las piezas de trabajo se cargan en las máquinas, como cuando se monta una forja en la mesa de una fresadora para maquinarla; (b) se avanza una placa metálica hacia una prensa para ser estampada; (c) se retiran partes de una máquina y se cargan en otra, como cuando una forja maquinada se va a rectificar posteriormente para un mejor acabado de la superficie y exactitud dimensional, y (d) se ensamblan partes terminadas en un producto final.

Se define **manejo del material** como las funciones y los sistemas asociados con el transporte, el almacenamiento y el control de los materiales y partes en el ciclo total de manufactura del producto. El tiempo total requerido para las operaciones de manufactura reales depende del tamaño y forma de la parte y del conjunto de operaciones que se van a realizar. Observe que el tiempo ocioso y el requerido para transportar los materiales pueden constituir la mayor parte del tiempo consumido, lo que reduce la productividad. El manejo del material debe ser parte integral de la planeación, implementación y control de las operaciones de manufactura; además, debe ser repetible y predecible.

Un aspecto importante del flujo ordenado de los materiales y componentes a través del ciclo de manufactura es la **distribución de la planta**. El tiempo y las distancias que se requieren para desplazar las materias primas y las partes debe minimizarse (vea *manufactura esbelta* en la sección 39.6). Para partes que requieren operaciones múltiples, que suele ser el caso normal, el equipo debe agruparse alrededor del operador o de un robot o robots industriales (vea también *manufactura celular*, sección 39.2).

Métodos de manejo de materiales. Al seleccionar un método apropiado de manejo del material para una operación en particular, deben considerarse varios factores:

1. Forma, peso y características de las partes.
2. Distancias implicadas, posición y orientación de las partes durante su movimiento y en el destino final.
3. Condiciones de la trayectoria a lo largo de la cual se van a transportar las partes.
4. Nivel de automatización, controles necesarios y cualquier integración con otros equipos y sistemas.
5. Habilidad requerida del operador.
6. Consideraciones económicas.

Para las operaciones de manufactura en pequeños lotes, las materias primas y las partes se pueden manejar y transportar manualmente, pero este método por lo general es costoso; asimismo, debido a que involucra personas, en la práctica puede ser impredecible, poco confiable o inseguro. En contraste, en plantas de manufactura automatizadas se implementa el flujo de materiales y partes controlado por computadora, lo que da como resultado una mejor productividad con costos menores de mano de obra.

Equipo. Los tipos de equipo que se usan para mover materiales y partes en progreso consisten en bandas transportadoras, rodillos, carros, montacargas, monorrieles auto-propulsados y varios dispositivos y manipuladores mecánicos, eléctricos, magnéticos, neumáticos e hidráulicos. Estos instrumentos manipuladores están diseñados para ser controlados directamente por el operador o se automatizan para operaciones repetidas, como la carga y descarga de partes de máquinas herramienta, prensas y hornos. Los **manipuladores** son capaces de sujetar, mover y orientar partes pesadas, según se requiera, entre las operaciones de manufactura y el ensamble. Las piezas de trabajo se transfieren directamente de máquina a máquina. Las combinaciones de maquinaria que tienen la capacidad de transportar las partes sin el uso de aparatos adicionales para el manejo del material se llaman **dispositivos de transferencia integral**.

El manejo y movimiento flexible del material, con control en tiempo real, se ha convertido en parte integral de la manufactura moderna. En los *sistemas flexibles de manu-*

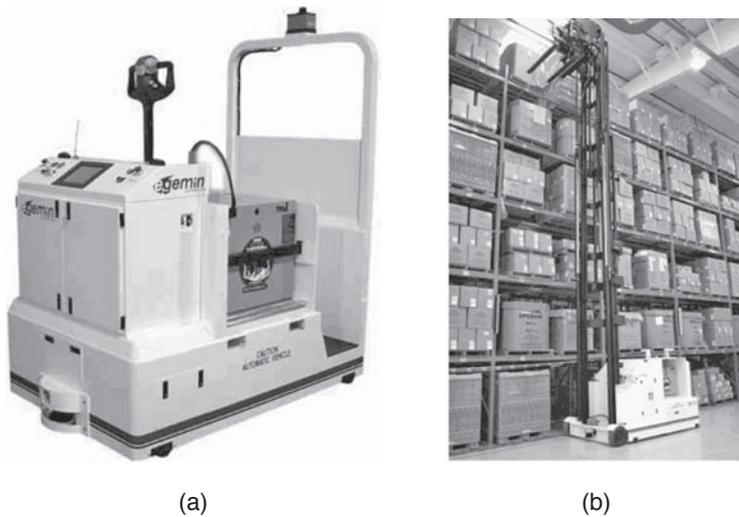


FIGURA 37.16 (a) Vehículo guiado automáticamente (tipo Tugger). Este vehículo adopta varias configuraciones para jalar carros montados sobre ruedas móviles; tiene un sensor láser para asegurar que opere con seguridad entre personas y diversas obstrucciones. (b) Vehículo guiado automáticamente configurado con montacargas para usarlo en una bodega. Fuente: Cortesía de Egemin, Inc.

factura se usan mucho los robots industriales, plataformas de diseño especial y **vehículos guiados automáticamente** (AGV, por sus siglas en inglés) para desplazar partes y orientarlas como se requiera (figura 37.16). Los AGV operan automáticamente a lo largo de trayectorias en una planta, con cableado en el piso o grabaciones para el barrido óptico para guiarlos sin intervención del operador.

Este sistema de transporte tiene gran flexibilidad y es capaz de atender en forma aleatoria a diferentes estaciones de trabajo. Optimiza el movimiento de materiales y partes en caso de congestión alrededor de éstas, descompostura de la máquina (*tiempo muerto*), o falla de una sección del sistema de producción.

Los movimientos de los AGV se planean de modo que tengan una interfaz con los **sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación** (AS/RS, por sus siglas en inglés) con el fin de utilizar el espacio de bodega de manera eficiente y de reducir los costos de mano de obra. Sin embargo, estos sistemas ahora no se consideran apropiados debido al énfasis actual en el *inventario mínimo* y en los métodos de producción *justo a tiempo* (sección 39.5).

Los *sistemas de codificación* que se han desarrollado para localizar e identificar partes en proceso a través del sistema de manufactura y transferirlos a las estaciones indicadas son los siguientes:

- **Código de barras**, incluye **códigos QR** (como también se les denomina en este libro), es el sistema de codificación más utilizado y el menos costoso.
- **Bandas magnéticas**, constituyen el segundo sistema más común.
- **Etiquetas de RF** (radiofrecuencia), se usan en ocasiones; aunque son caras no requieren estar a la vista, lo que es esencial para los dos sistemas anteriores, tienen un amplio rango y se puede reescribir en ellas.
- **Ondas acústicas, reconocimiento óptico de caracteres y visión de máquina**, son los principios de otros sistemas de identificación.

37.6 Robots industriales

La palabra **robot** fue acuñada en 1920 por el autor checo K. Čapek, en su obra *R. U. R.* (Rossum's Universal Robots); se deriva de la palabra *robota*, que significa “trabajador”. La International Organization for Standardization (ISO) ha descrito el término **robot industrial** como una máquina que consiste en un mecanismo que incluye varios brazos que terminan en una articulación capaz de sujetar una herramienta, pieza de trabajo o dispositivo de inspección. En particular, la unidad de control de un robot debe usar un método de memorización y también emplear dispositivos sensores o de adaptación para tomar en cuenta el ambiente y circunstancias especiales.

Los robots industriales se introdujeron por primera vez a principios de la década de 1960. Los robots controlados por computadora se comercializaron a principios de la década de 1970 y en 1974 apareció el primer robot controlado por una microcomputadora. Los robots industriales se empleaban al principio en operaciones peligrosas como el manejo de materiales tóxicos y radiactivos y la carga y descarga de piezas de trabajo calientes de los hornos en las fundiciones.



Código QR 37.1 Las aplicaciones más comunes de los robots industriales. (Fuente: © 2012, Cortesía de ABB).

Una regla práctica para las aplicaciones de los robots es la conocida en Estados Unidos como de las tres D, por *Dull* (simple), *Dirty* (sucio) y *Dangerous* (peligroso) (una cuarta sería *Demeaning*, degradante) y la de las tres H por *Hot* (caliente), *Heavy* (pesado) y *Hazardous* (riesgoso). Ahora los robots industriales son componentes indispensables en casi todas las operaciones de manufactura y tienen una productividad mejorada en gran manera.

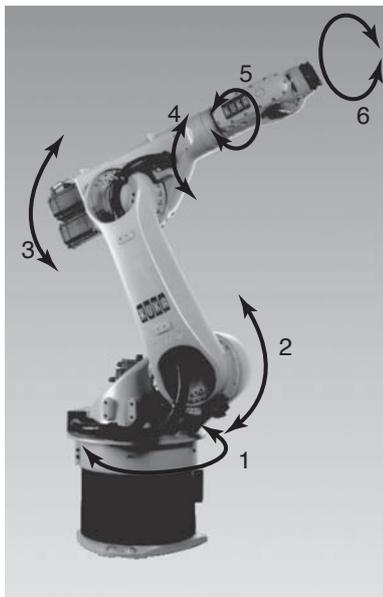
37.6.1 Componentes de un robot

Un robot industrial (figura 37.17) tiene cierto número de componentes básicos.

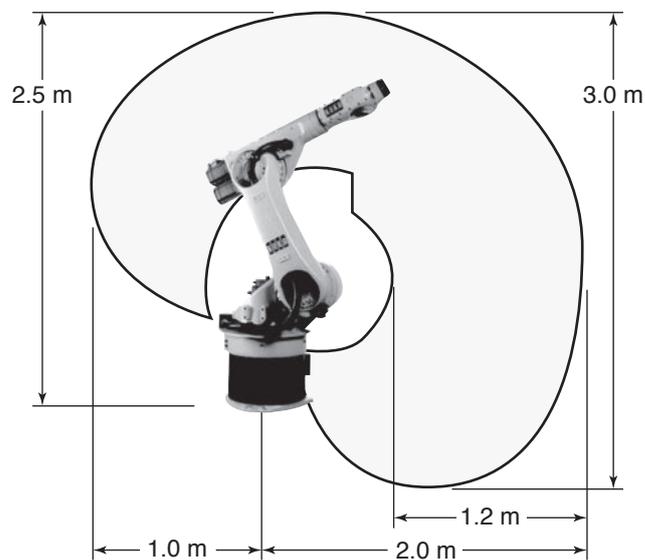
Manipulador. También llamado **brazo y muñeca**, el *manipulador* es un dispositivo mecánico que proporciona movimientos (trayectorias) parecidos a los de un brazo y mano humanos. El extremo de la muñeca alcanza un punto en el espacio si tiene un conjunto específico de coordenadas y en una orientación explícita. La mayor parte de los robots tienen seis puntos de rotación; también hay robots con siete grados de libertad (robots *redundantes*) para aplicaciones especiales.

Efecto final. El extremo de la muñeca de un robot está equipado con un *efector final*, también llamado *herramienta del final del brazo*. En función del tipo de operación, los efectores finales convencionales están equipados con alguno de los dispositivos siguientes (figura 37.18):

- Sujetadores, ganchos, palas, electroimanes, diafragmas de vacío y dedos adhesivos para el manejo de materiales (figura 37.19a).
- Pistolas de aire para pintar.
- Accesorios para soldadura de un punto y de arco, o láser (figura 37.19b), y para cortar con arco.
- Herramientas de potencia, como taladros, llaves de tuercas y punzones (figuras 37.18b y c).
- Instrumentos de medición (figura 37.18e).



(a)



(b)

FIGURA 37.17 (a) Ilustración esquemática de un robot de seis ejes KR-30 KUKA; la capacidad de carga de la muñeca es de 30 kg y su repetibilidad es de ± 0.15 mm (0.006 pulg). El robot tiene frenos mecánicos en todos sus ejes, los cuales están acoplados directamente uno con otro. (b) Vista lateral de la envoltura de trabajo del robot. *Fuente:* Cortesía de KUKA Robotics Corp.

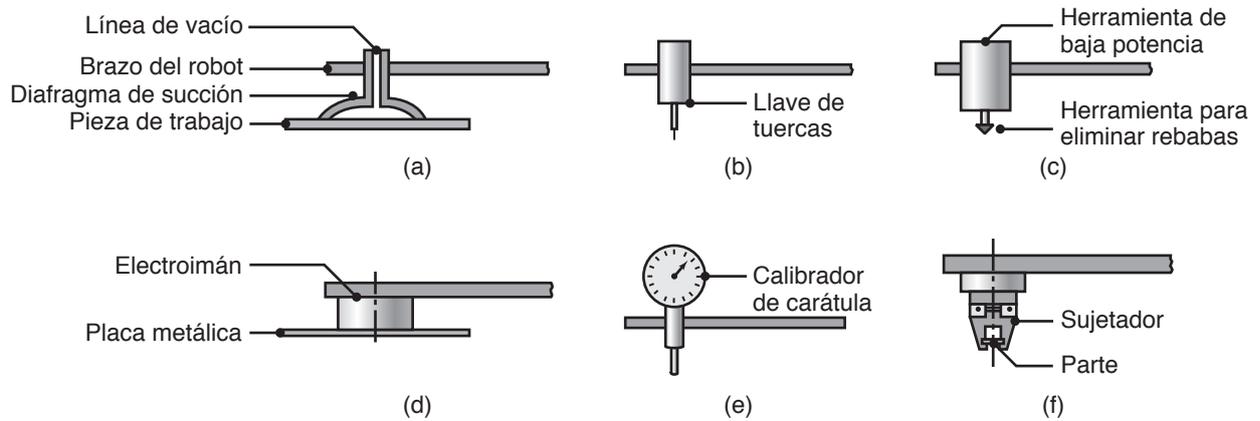
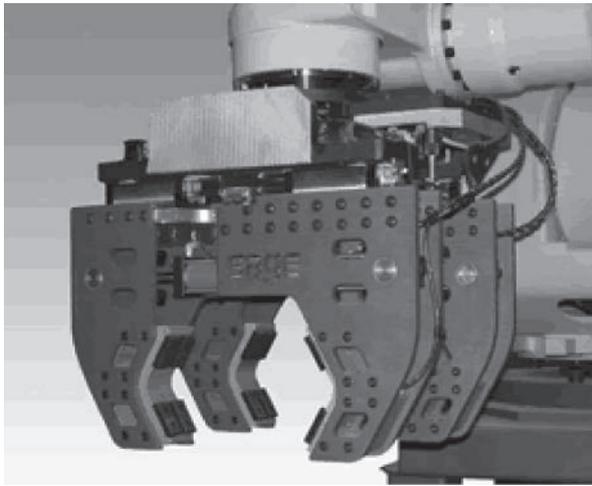


FIGURA 37.18 Tipos de herramientas y dispositivos sujetos a efectores finales para realizar varias operaciones.



(a)



(b)

FIGURA 37.19 Ejemplos de efectores finales. (a) Sujetador con cuatro dedos y (b) cabezal cortador láser. Fuente: (a) Cortesía de RoboMatrix; (b) cortesía de la Fabricators & Manufacturers Association.

Los sujetadores mecánicos, equipados con dos o más dedos, son los de uso más común. Los **efectores de compensación final** se usan por lo general para manejar materiales frágiles o facilitar el ensamblaje; pueden usar mecanismos que limitan la fuerza aplicada a la pieza de trabajo o ser diseñados con la rigidez deseada. La selección de un efector final apropiado para una aplicación específica depende de factores como la carga, ambiente, confiabilidad y costo; en consecuencia, por lo general, los efectores finales se fabrican para cumplir requerimientos específicos de manipulación.

Suministro de energía. Cada movimiento del manipulador (lineal o rotacional) es controlado y regulado por actuadores independientes que usan energía eléctrica, neumática o hidráulica. Cada fuente de energía y cada tipo de motor tiene sus propias características, aplicaciones, ventajas y limitaciones.

Controlador. También conocido como *sistema de control*, el controlador es el sistema de comunicaciones y procesamiento de información que da los comandos para los movimientos del robot; es el cerebro del robot y almacena los datos para iniciar y terminar los movimientos del manipulador. El controlador también es el sistema nervioso del robot; es la interfaz con las computadoras y otros equipos como células de manufactura o sistemas de ensamble.

Los **dispositivos de retroalimentación**, como los transductores, son parte importante del sistema de control. Los robots con un conjunto fijo de movimientos tienen *control de lazo abierto*, en el cual se emiten los comandos y el brazo del robot ejecuta sus movimientos. A diferencia de los sistemas de *control de lazo cerrado*, la exactitud de los movimientos de los sistemas de lazo abierto no se vigila; en consecuencia, un sistema de lazo abierto no tiene capacidad de autocorrección.

Dependiendo de la tarea en particular, la capacidad de *repetir el posicionamiento* requerida puede ser tan pequeña como 0.050 mm (0.002 pulg), como lo necesitarían las operaciones de ensamble de tarjetas de circuitos electrónicos impresos (sección 28.13, en el sitio web del libro). La exactitud y repetibilidad varían mucho con la carga y con la posición dentro de la envolvente de trabajo.

37.6.2 Clasificación de los robots

Los robots se clasifican por sus tipos básicos (figura 37.20):

1. Cartesianos, o rectilíneos.
2. Cilíndricos.
3. Esféricos, o polares.
4. Articulados, de *revoluta*, con *uniones* o *antropomórficos*.

Los robots pueden estar permanentemente fijos al piso de la planta; también es posible que se muevan a lo largo de rieles elevados (*robots gantry*) o que estén equipados con ruedas para desplazarse por el piso de la fábrica (*robots móviles*).

Robots de secuencia fija y variable. El *robot de secuencia fija*, también llamado **robot que toma y coloca**, está programado para ejecutar una secuencia específica de operaciones; sus movimientos son de punto a punto y el ciclo se repite de manera continua. Estos robots son sencillos y relativamente baratos. El *robot de secuencia variable* también está programado para realizar una secuencia específica de operaciones, pero se puede *reprogramar* para que efectúe otras diferentes.

Robot de reproductor de movimiento. Un operador dirige o encamina al *robot reproductor* y a su efector final a través de la trayectoria deseada; en otras palabras, el operador *enseña* al robot al mostrarle qué hacer. El robot registra la trayectoria y secuencia de los movimientos y los repite continuamente sin más acción o guía del operador. El robot

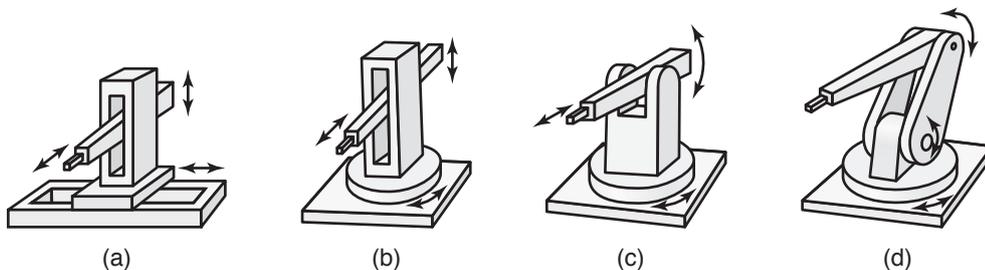


FIGURA 37.20 Cuatro tipos de robots industriales: (a) cartesiano (rectilíneo); cilíndrico; (c) esférico (polar), y (d) articulado (de revoluta, con uniones o antropomórfico).

de **aprendizaje asistido** (*teach pendant*) utiliza un conjunto de botones para manipulación conectados al panel de control; los botones se usan para controlar y guiar al robot y sus herramientas a través del trabajo que se va a ejecutar. Después, esos movimientos quedan registrados en la memoria del controlador y el robot los repite automáticamente siempre que sea necesario.

Robot controlado numéricamente. Este tipo de robot se programa y opera en forma muy parecida a una máquina de control numérico; está controlado por servomecanismos con datos digitales y la secuencia de movimientos se puede modificar con relativa facilidad. Como en las máquinas de control numérico, hay dos tipos básicos de control. (1) Los robots de *punto a punto* son fáciles de programar y tienen una gran capacidad de carga, así como una **envolvente de trabajo** más amplia, que es el alcance máximo en cualquier dirección de la mano del robot o herramienta de trabajo, como se ilustra en la figura 37.21. (2) Los robots de *trayectoria continua* tienen más exactitud que los de punto a punto, pero poseen menor capacidad de carga.

Robot inteligente. El *robot inteligente*, también llamado *robot sensorial*, es capaz de ejecutar algunas de las funciones y tareas que efectúan los humanos. El robot está equipado con varios sensores con capacidad *visual* (*visión computarizada*) y *táctil* (sección 37.7). En forma muy parecida a como lo hacen los humanos, el robot observa y evalúa su entorno inmediato y su proximidad a los objetos (en especial, a la maquinaria), por medio de la percepción y el *reconocimiento de patrones*. Después toma las decisiones apropiadas para el siguiente movimiento y procede en consecuencia.

Los avances en los robots inteligentes incluyen:

- Comportamiento más parecido al de los humanos y ejecución de tareas como el desplazarse entre varias máquinas y equipos en el taller evitando las colisiones.
- Reconocimiento, selección y sujeción adecuada de la materia prima o pieza de trabajo correcta para su procesamiento posterior.
- Transportar una parte de máquina a máquina.
- Ensamblar componentes en subensambles o en el producto final.

37.6.3 Aplicaciones y selección de robots

Las principales aplicaciones de los robots industriales incluyen:

- Operaciones de manejo de material, que se ejecutan de manera confiable y repetitiva, con lo que mejora la calidad y se reducen las pérdidas por desperdicios. Algunos

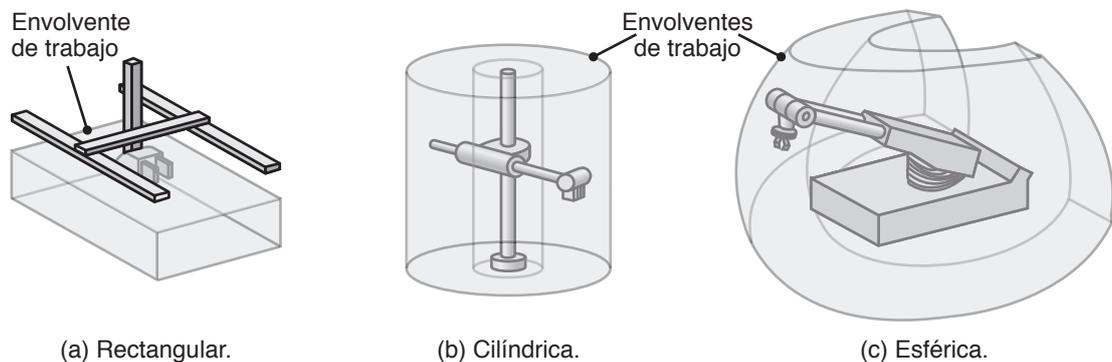


FIGURA 37.21 Envolventes del trabajo de tres tipos de robot; su selección depende de la aplicación particular (vea también la figura 37.17b).

ejemplos son (a) operaciones de fundición y moldeo en las que se maneja metal fundido, materias primas y partes en distintas etapas de procesamiento, sin interferencia del operador; (b) operaciones de tratamiento con calor en las que se cargan y descargan partes de hornos y baños de enfriamiento y (c) operaciones en que las partes se cargan y descargan desde prensas y otros tipos de maquinaria de trabajo de metales.

- Soldadura por puntos de carrocerías de automóviles y camiones; produce soldaduras de buena calidad (figura 37.22a). Los robots también realizan otras operaciones semejantes, como la soldadura de arco, corte con arco y remachado.
- Se pueden efectuar operaciones como la eliminación de rebabas, rectificado y pulido empleando las herramientas apropiadas adjuntas a los efectores finales.
- Aplicación de adhesivos y selladores, como en la carrocería que se muestra en la figura 37.22b.
- Aplicaciones frecuentes son la pintura con aire (en particular de formas complejas) y operaciones de limpieza, porque los movimientos requeridos para el tratamiento de una pieza se repiten exactamente iguales para la siguiente.
- Ensamble automatizado (figura 37.23).
- Inspección y calibración a velocidades mucho mayores que las que logran los humanos.

Selección de robots. Los factores que influyen en la selección de robots en la manufactura son:

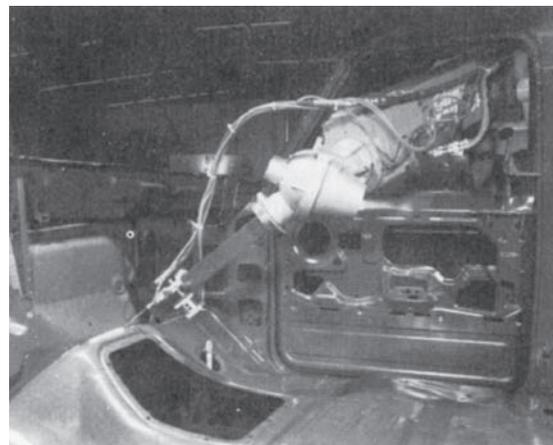
- Capacidad de carga.
- Envoltente de trabajo (vea las figuras 37.17b y 37.21).
- Velocidad de movimiento.
- Confiabilidad.
- Repetibilidad.
- Configuración del brazo.
- Grados de libertad.
- Sistema de control.



Código QR 37.2 Robots usados para pintar carrocerías. (Fuente: © 2012, cortesía de ABB).



(a)



(b)

FIGURA 37.22 Ejemplos de aplicaciones de robots industriales. (a) Soldadura por puntos de carrocerías de automóvil. (b) Sellado de las uniones de una carrocería. Fuente: (b) Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

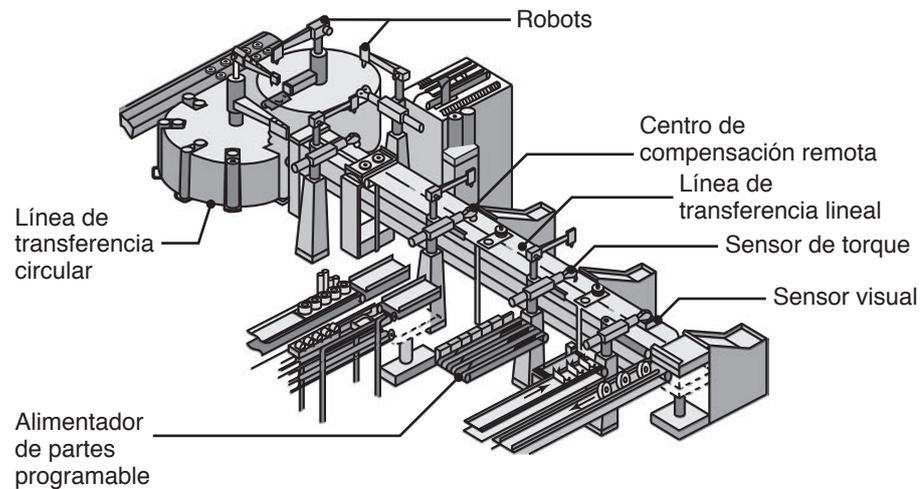


FIGURA 37.23 Operaciones de ensamblaje automatizado con el uso de robots industriales y líneas de transferencia circular y lineal.

Economía. Además de los factores técnicos, las consideraciones de costo y beneficio son aspectos importantes en la selección y uso de robots. Debido a su creciente disponibilidad, confiabilidad y costos reducidos, los robots inteligentes están teniendo un efecto importante en las operaciones de manufactura.

Seguridad con los robots. En función del tamaño de la envolvente del trabajo del robot, velocidad y proximidad a los humanos, son importantes las consideraciones de seguridad en un ambiente con robots, en particular para los programadores y el personal de mantenimiento que tiene interacción física directa con ellos. Además, el movimiento del robot con respecto a otras máquinas requiere un alto nivel de confiabilidad para evitar colisiones y daños a los equipos cercanos. Las actividades del robot en cuanto al manejo de materiales requieren el aseguramiento apropiado de las materias primas y partes en su dispositivo sujetador en varias etapas de la línea de producción.

CASO DE ESTUDIO 37.1 Eliminación robotizada de las rebabas en un trineo moldeado por soplado

La empresa Roboter Technologie, de Bassel, Suiza, produce trineos y asientos de automóvil de alta calidad hechos de plástico con moldeo por inyección (sección 19.3) o moldeo por soplado (sección 19.4). Después del moldeo y mientras la parte se enfría, se tienen que hacer agujeros y eliminar las rebabas (sección 26.8). La operación de eliminación de rebabas es ideal para que la realice un robot, pero es muy difícil de automatizar. Si se usara una herramienta giratoria para hacerlo, se generaría humo y partículas que serían un riesgo para la salud, y un cortador no rotatorio requiere que el robot permita desviaciones en su trayectoria programada con el fin de permitir variaciones por la contracción de las partes moldeadas.

La compañía Roboter Technologie encontró una solución: una herramienta montada flotante (vea *efectores de compensación final* en la sección 37.6.1) que puede

alojar varias navajas cortadoras. Para quitar las rebabas, la navaja debe mantener el ángulo de corte correcto y una fuerza constante. Esta tarea se logra con un robot KUKA KR-15, que ejecuta las operaciones de corte y limpieza en un solo paso mientras hace también la compensación por la contracción del plástico (figura 37.24).

Tan pronto como la parte moldeada por aire deja la moldeadora, un operador quita las manchas y coloca la parte en una mesa indexable rotatoria (figura 37.4b). Cuando una parte se gira en el espacio de trabajo del robot, éste corta y quita las rebabas de los agujeros; una vez cortadas y limpias las partes laterales, el sujetador coloca el trineo en posición vertical de modo que es posible tener acceso a su parte superior. Durante el procesamiento de cada trineo se usa un cambiador de herramientas automático (sección 25.2) para pasar de un cortador convexo (para hacer los cortes) a otro

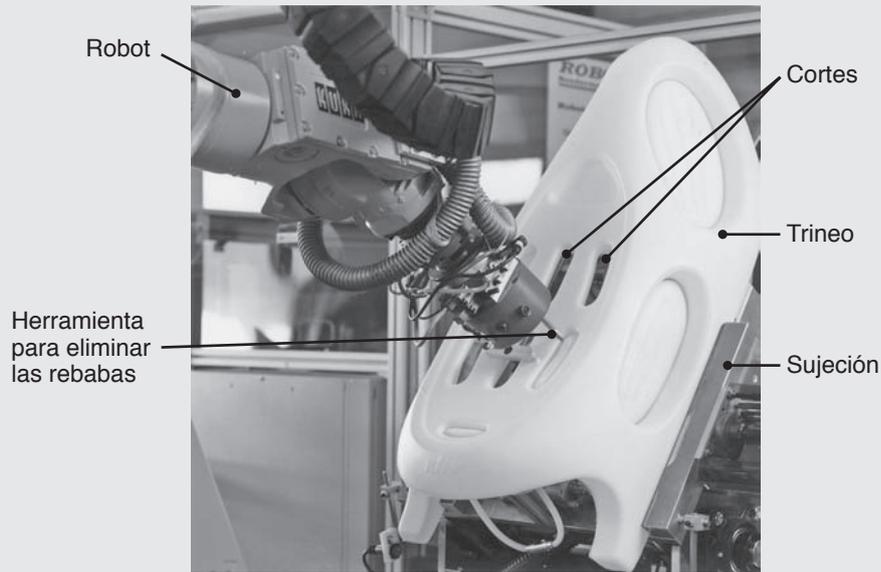


FIGURA 37.24 Eliminación robotizada de las rebabas de un trineo moldeado por aire. *Fuente:* Cortesía de Kuka Robotics, Inc., y Roboter Technologie, GmbH (vea también la figura 26.34).

cortador recto con el fin de producir un contorno exterior suave.

La compleja forma de un trineo es un buen ejemplo de la flexibilidad que logran los robots. El robot completa la operación de maquinado de 40 a 50 segundos, en oposición al tiempo de 120 segundos del ciclo del proceso de moldeo; así, la implementación del robot es consistente con las metas de un sistema de jalar (vea la sección 39.5). El robot se usó con éxito en un ambiente peligroso y sucio y se eliminaron tareas

asociadas con lesiones ocasionadas por la exposición a humos y al movimiento de la muñeca de la mano en la operación manual. Además, debido a la alta calidad de la eliminación de las rebabas y a la ausencia de partes rechazadas, la célula del robot se pagó a sí misma en sólo tres meses.

Fuente: Cortesía de Kuka Robotics, Inc., y Roboter Technologie, GmbH.

37.7 Tecnología de sensores

Un *sensor* es un dispositivo que produce una señal en respuesta a su propiedad específica de detección o medición, como la posición, fuerza, par, presión, química, temperatura, humedad, velocidad, aceleración o vibración. Tradicionalmente se han usado actuadores e interruptores para fijar límites en el desempeño de las máquinas, como (a) detener máquinas herramienta para restringir los movimientos de la mesa de trabajo; (b) medir la presión y temperatura con dispositivos automáticos de detención y (c) gobernar motores para impedir una velocidad de operación excesiva.

Actualmente la tecnología de sensores es un aspecto importante de los procesos y sistemas de manufactura, y es esencial para la obtención de datos, monitoreo, comunicación y control computarizado de las máquinas y sistemas (figura 37.25). Los sensores son necesarios para el control de robots inteligentes y se desarrollan los llamados **sensores inteligentes**, con capacidades que imitan las de los humanos.

Debido a que convierten una cantidad en otra, es frecuente que se haga referencia a los sensores como *transductores*. Los **sensores analógicos** producen una señal, como voltaje, que es proporcional a la cantidad medida. Los **sensores digitales** tienen salidas digitales que se pueden transferir directamente a computadoras. Existen *convertidores*

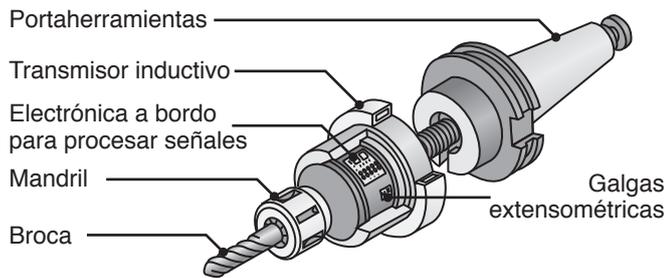


FIGURA 37.25 Portaherramientas equipado con sensores de la fuerza de empuje y del par (portaherramientas inteligente) capaces de monitorear continuamente la operación de corte; estos portaherramientas son esenciales para el control adaptativo de las operaciones de manufactura.

analógico-digitales (ADC, por sus siglas en inglés) que actúan como interfaz entre los sensores analógicos y las computadoras.

37.7.1 Clasificación de sensores

Los sensores de mayor interés en las operaciones de manufactura por lo general se clasifican como sigue:

- **Mecánicos**, miden cantidades como la deformación, masa, posición, forma, velocidad, fuerza, torque, presión y vibración.
- **Químicos**, hacen la medición de las concentraciones de los productos químicos objetivo. Un ejemplo común es el sensor de O_2 en un automóvil, que mide la cantidad de oxígeno gaseoso en el escape; esto permite hacer inferencias acerca de las

cantidades apropiadas del gas y de la entrada de combustible con objeto de minimizar las emisiones dañinas.

- **Eléctricos**, para medir el voltaje, corriente, carga y conductividad eléctrica.
- **Magnéticos**, miden el campo magnético, flujo y permeabilidad.
- **Térmicos**, miden la temperatura, flujo, conductividad térmica y calor específico.
- Otros tipos de sensores son **acústicos**, **ultrasónicos**, **ópticos**, de **radiación**, **láser** y de **fibra óptica**.

Según su aplicación, un sensor consiste en materiales metálicos, no metálicos, orgánicos o inorgánicos, así como en fluidos, gases, plasmas o semiconductores. Al utilizar las características especiales de dichos materiales, los sensores convierten la cantidad o propiedad medida en una salida analógica o digital. Por ejemplo, la operación de un termómetro de mercurio común se basa en la diferencia entre la expansión térmica del mercurio y la del vidrio. De la misma manera, una parte de máquina, una obstrucción física o una barrera en un espacio se pueden detectar por la interrupción de un haz de luz percibida por una celda fotoeléctrica. Un *sensor de proximidad*, que percibe y mide la distancia a un objeto o miembro en movimiento de una máquina, puede basarse en acústica, magnetismo, capacitancia u óptica. Otros tipos de sensores contactan el objeto y después emprenden la acción apropiada, por lo general con medios electromecánicos.

Percepción táctil. La percepción *táctil* involucra el detectar continuamente fuerzas variables de contacto, comúnmente por medio de un arreglo de sensores. Dicho sistema es capaz de operar dentro de un espacio tridimensional arbitrario. Las partes frágiles, como huevos, objetos de vidrio delgado y dispositivos electrónicos, son manipuladas por robots con *efectores de compensación final (inteligentes)*. Estos efectores detectan la fuerza aplicada al objeto que se manipula, con el empleo, por ejemplo, de medidores de tensión, dispositivos piezoeléctricos, inducción magnética, ultrasónica y sistemas ópticos de fibra óptica y diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés).

La fuerza que se percibe es monitoreada y controlada por medio de equipos de retroalimentación de lazo cerrado. Los sujetadores de compensación, con capacidad de retroalimentación de la fuerza y percepción sensorial, son complejos y requieren computadoras poderosas. Los *efectores antropomórficos finales* están diseñados para simular la mano y los dedos humanos y para tener la capacidad de percibir contactos, fuerza y movimiento. El sensor táctil ideal también debe percibir el *deslizamiento*, una capacidad normal de los dedos y manos humanos; observe, por ejemplo, cómo aun con los ojos cerrados se siente si un objeto comienza a deslizarse de la mano propia.

Percepción visual. En la percepción visual se hace el barrido de una imagen por medio de cámaras y el software procesa los datos. Sus aplicaciones más importantes en la

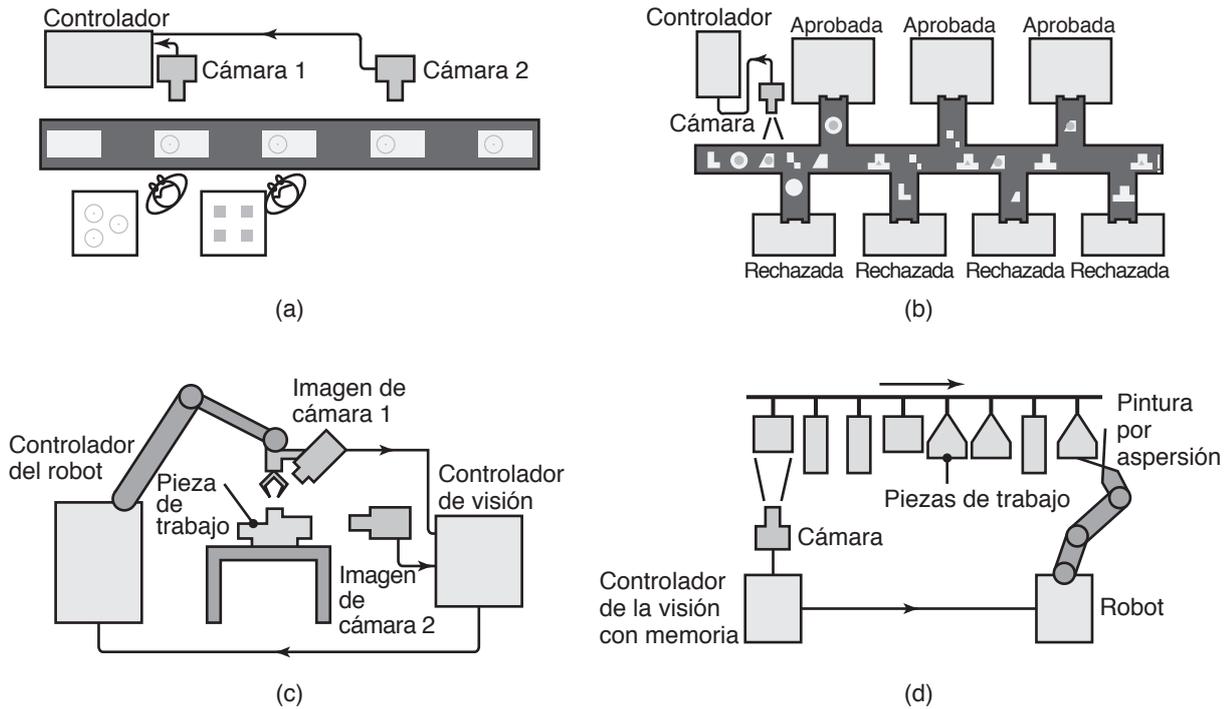


FIGURA 37.26 Ejemplos de aplicaciones de máquinas con visión. (a) Inspección en línea de partes. (b) Identificación de partes con varias formas e inspección y rechazo de las partes defectuosas. (c) Uso de cámaras que dan datos de entrada posicional a un robot acerca de la pieza de trabajo. (d) Pintura de partes que tienen distintas formas y entrada desde una cámara; la memoria del sistema permite que el robot identifique la forma particular por pintar y proceder con los movimientos correctos de una pistola sujeta al efector final.

manufactura son el *reconocimiento de patrones* (figura 37.26), la detección de bordes y la transferencia de información, como ocurre con códigos de barras sencillos.

La *visión de máquina* usa comúnmente cámaras digitales que se comunican con una computadora por medio de conexiones inalámbricas, USB o Ethernet. El barrido tiene lugar en (a) una dimensión (barrido en línea, como el de los códigos de barras); (b) dos dimensiones (escaneo 2D, como los códigos QR) o (c) en tres dimensiones (barrido 3D, como el escaneo CT o cámaras confocales, como se ilustra en la figura 37.27). El barrido tridimensional se ha vuelto más común, con software poderoso disponible y que permite incluso que cámaras digitales sencillas instaladas en teléfonos móviles tomen datos tridimensionales. La mayoría de las aplicaciones de manufactura requieren escaneo en 2D, aunque los escaneos en 3D son útiles para capturar la geometría.

La visión de máquina es útil en particular (a) para partes inaccesibles de difícil acceso; (b) en ambientes de manufactura hostiles; (c) para medir un gran número de pequeñas características y (d) en situaciones en las que el contacto físico dañaría la parte. Las aplicaciones de la visión de máquina incluyen la inspección en línea y en tiempo real en líneas y sensores de estampado de placas metálicas para máquinas herramienta que perciben la desviación y rotura de la herramienta, verifican la colocación y sujeción de la parte y monitorean el acabado de la superficie.



FIGURA 37.27 Uso de un escáner 3D para digitalizar la geometría de un fundido (abajo) para generar un archivo de datos en 3D que describe la geometría (arriba). El archivo de datos se puede usar después para el control de calidad o se puede enviar a una impresora 3D para producir una parte con la misma geometría.

Aplicaciones. En la figura 37.26 se ilustran varias aplicaciones de la visión de máquina en la manufactura. Con sus capacidades de percepción visual, los efectores finales son capaces de tomar partes y sujetarlas en la orientación y ubicación apropiadas. La visión de máquina es capaz de identificar e inspeccionar en línea las partes y rechazar las defectuosas. Los *sensores robustos* se desarrollaron para soportar temperaturas extremas, impactos y vibraciones, humedad, corrosión, polvo y otros contaminantes, fluidos, radiación electromagnética y otras interferencias.

La *selección* de un sensor para una aplicación particular depende de factores como los siguientes:

- Cantidad particular por medir o percibir.
- Interacción del sensor con otros componentes del sistema.
- Vida de servicio esperada del sensor.
- Nivel de sofisticación.
- Dificultades asociadas con su uso.
- Fuente de energía.
- Costo.

Sensores inteligentes. Tienen la capacidad de ejecutar una función lógica, tener comunicación de dos vías, tomar decisiones y emprender acciones apropiadas. El conocimiento requerido para tomar una decisión se puede construir en un *sensor inteligente*; por ejemplo, al maquinar se puede programar el chip de una computadora para apagar una máquina herramienta cuando se rompe el cortador. Del mismo modo, un sensor inteligente impide que un robot móvil o un brazo robótico entre en contacto accidental con un objeto o una persona, al percibir cantidades como distancia, calor y ruido.

37.7.2 Fusión de sensores

La *fusión de sensores* involucra la integración de varios sensores de modo que los datos individuales de cada uno de ellos (como fuerza, vibración, temperatura y datos dimensionales) se combinan para dar un mayor nivel de información y confiabilidad. Una aplicación simple de la fusión de sensores es cuando alguien bebe una taza de café caliente. Aunque es un evento tan común que se da por garantizado, es evidente que dicha actividad implica la entrada de datos de ojos, labios, lengua y manos. A través de los cinco sentidos básicos de la vista, oído, olfato, gusto y tacto, ahora existe el monitoreo en tiempo real de movimientos relativos, posiciones y temperaturas. Por ejemplo, si el café está demasiado caliente, el movimiento de la mano con la taza hacia los labios es reducido y por tanto se ajusta; observe que los dedos y la mano también sienten la temperatura, lo que se convierte en una entrada al sistema de control.

Las primeras aplicaciones en ingeniería de la fusión de sensores ocurrieron en el control del movimiento de robots, rastreo del vuelo de misiles y otras aplicaciones militares parecidas, con frecuencia cuando dichas actividades involucran movimientos que imitan el comportamiento humano. Un aspecto importante de la fusión de sensores es la *validación del sensor*: se detecta la falla de un sensor de modo que el sistema de control mantiene una gran confiabilidad; por tanto es esencial recibir datos redundantes desde diferentes sensores.

La fusión de sensores se ha vuelto práctica y está disponible a un costo relativamente bajo, sobre todo debido a los avances hechos en el tamaño de los sensores, la calidad y tecnología, así como en los desarrollos continuos en los sistemas de control computarizados, inteligencia artificial, sistemas expertos y redes neurales artificiales, todo lo cual se describe en el capítulo 39.

37.8 Sujeción flexible

Al describir los *dispositivos de sujeción del trabajo* para las operaciones de manufactura, en este libro se usaron con frecuencia las palabras *mordazas*, *plantillas* y *sujetador* de manera indistinta y en ocasiones por parejas, como en portapiezas y sujetadores. En suma,

- **Mordazas**, son dispositivos simples y multifuncionales para sujetar el trabajo.
- **Plantillas**, tienen varias superficies y puntos de referencia para la alineación exacta de partes o herramientas.
- **Sujetadores**, por lo general están diseñados para aplicaciones específicas.

Otros equipos comunes para sujetar el trabajo son los *platos*, *tenazas* y *mandriles*. Algunos accesorios para sujetar el trabajo, como los *platos de potencia*, se diseñan y operan en varios niveles de mecanización y automatización y son movidos por medios mecánicos, hidráulicos o eléctricos. Por lo general, los dispositivos de sujeción tienen rangos específicos de capacidad. Por ejemplo, (a) una tenaza en particular puede acomodar barras sólo dentro de cierto rango de diámetros; (b) los platos de sujeción de cuatro mordazas reciben piezas de trabajo cuadradas o prismáticas que tienen cierto rango de dimensiones; (c) los *sujetadores especiales* se diseñan y fabrican para formas y dimensiones específicas de la pieza de trabajo y para tareas dadas y (d) si una pieza de trabajo tiene superficies curvas, las superficies de contacto de las mordazas se conforman con maquinado para que se adapten a las superficies de la pieza de trabajo, lo que se conoce como *mordazas maquinables*.

El surgimiento de sistemas flexibles de manufactura ha hecho necesario el diseño y uso de dispositivos y sujetadores de la pieza de trabajo que cuentan con *flexibilidad construida*. Hay varios métodos de **sujeción flexible**, con base en diferentes principios, llamados **sistemas de sujeción inteligente**. Estos equipos son capaces de recibir con rapidez un rango de formas y dimensiones de la parte, sin que se requieran grandes cambios, ajustes o la intervención del operador.

Sujeción modular. La *sujeción modular* se utiliza con frecuencia para lotes de tamaño pequeño o moderado, en especial cuando el costo de arreglos especiales y el tiempo requerido para producirlos es difícil de justificar. Las piezas de trabajo complejas se localizan dentro de las máquinas empleando sujetadores producidos a partir de componentes estándar y se desensamblan cuando se termina la corrida de producción. Los sujetadores modulares se suelen basar en placas o bloques de herramientas configuradas con rejillas perforadas o ranuras tipo T sobre las que se construye un sujetador.

Para producir un sujetador rápido se montan sobre una *placa* o *bloque* base varios componentes estándar, como pernos de localización, soportes de la pieza de trabajo, bloques en V, pinzas, resortes y frenos ajustables. Con el empleo de robots industriales y técnicas de planeación de sujetadores asistida por computadora, se diseñan, ensamblan y modifican dichos accesorios de sujeción. En comparación con los sujetadores especiales, los modulares son de bajo costo, requieren menos tiempo, tienen componentes que se reparan con más facilidad y poseen una flexibilidad intrínseca de aplicación.

Sujetadores de columna. También conocidos como *sujetadores tipo pedestal*, los *sujetadores de columna* tienen de dos a seis caras verticales (lo que les da el aspecto de lápidas) sobre las que se montan las piezas de trabajo. Estos sujetadores por lo común se utilizan en la manufactura automatizada o asistida por robots. La máquina herramienta realiza las operaciones deseadas sobre una cara de la pieza de trabajo, después se desliza o gira el sujetador para trabajar en las otras superficies. Los sujetadores de columna se usan comúnmente para tener mayor volumen de producción, sobre todo en la industria automotriz (vea el caso de estudio 24.2).

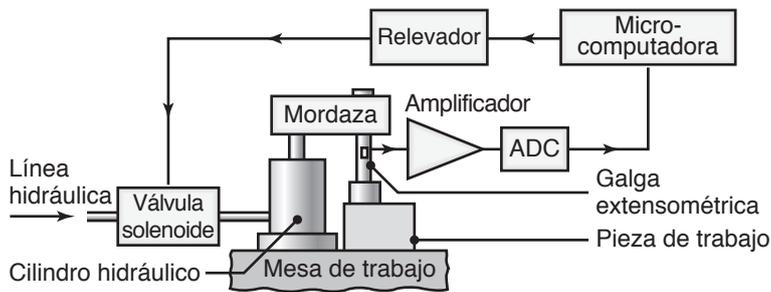


FIGURA 37.28 Ilustración esquemática de un sistema de mordaza de fuerza ajustable; la fuerza de sujeción es percibida por el medidor de deformación y el sistema la ajusta automáticamente. *Fuente:* Basado en P. K. Wright.

Dispositivo de cama de clavos. Este tipo de sujetador consiste en una serie de *pernos activados por aire* que se adaptan a la forma de las superficies externas de la pieza de trabajo. Cada perno se mueve según sea necesario para adaptarse a la forma en su punto de contacto con la pieza; estos pernos después se bloquean mecánicamente contra la pieza. El dispositivo es compacto, tiene mucha rigidez y es reconfigurable.

Mordaza de fuerza ajustable. En la figura 37.28 se ilustra en forma esquemática este tipo de sistema. El medidor de deformación montado en la pinza percibe la magnitud de la

fuerza de sujeción; después, el sistema ajusta dicha fuerza para que mantenga asegurada la pieza de trabajo para la aplicación particular. También se impiden fuerzas de sujeción excesivas que dañarían la superficie de la pieza de trabajo, en particular si es suave o tiene un diseño delgado.

Materiales que cambian de fase. Hay dos métodos distintos de usar herramientas duras, capaces de sujetar piezas de trabajo de forma irregular o curvada:

1. Se usa un *metal de bajo punto de fusión* como medio de sujeción. Por lo común se sumerge una pieza de trabajo de forma irregular en plomo fundido y se deja que solidifique (como cuando se inserta un palillo de madera en una paleta), en un proceso parecido al *moldeo por inserción* (secciones 11.3.5 y 19.3). Después de que se enfría, el bloque de plomo solidificado se asegura en un sujetador sencillo. Sin embargo, debe considerarse el posible efecto perjudicial de sujetar materiales como el plomo en la pieza de trabajo (debido a la *fragilización por metal líquido*; vea la sección 1.5.2).
2. El medio de soporte es un fluido *magnetorreológico* (MR) o *electrorreológico* (ER). En el método MR las partículas son ferromagnéticas o paramagnéticas de tamaño nanométrico en un fluido que no es magnético; se agregan espumantes para evitar que las partículas se asienten. Después de sumergir la pieza de trabajo en el fluido se aplica un campo magnético externo, con lo que las partículas se polarizan y el comportamiento del fluido cambia del de un líquido al de un sólido. La pieza de trabajo se recupera luego al suprimir el campo magnético externo. En el método ER el fluido es una suspensión de partículas dieléctricas finas en un líquido de baja constante dieléctrica. Con la aplicación de un campo eléctrico el líquido se convierte en sólido.

37.9 Sistemas de ensamble

Las partes y componentes individuales que se producen con varios procesos de manufactura deben *ensamblarse* en los productos terminados. La operación de ensamble total suele descomponerse en otras individuales (*subensambles*), con un operador asignado para que ejecute cada etapa. De manera tradicional, el ensamble involucraba mucho trabajo manual y por tanto contribuía significativamente al costo del producto.

Por el tipo de producto, los costos del ensamble varían mucho. Por ejemplo, los iPhone de Apple cuestan de \$12.50 a \$30.00 dólares estadounidenses del total de la mano de obra, con un costo total de \$200.00 a \$600.00. Los costos del ensamble son de 10 a 50% del costo total de manufactura, con un porcentaje de trabajadores dedicados a dichas operaciones que va de 20 a 60%. En los países desarrollados, con mucha productividad y automatización, el número de trabajadores asignados al ensamble

está en el extremo bajo de este rango; en países con mano de obra barata el porcentaje es mayor. A medida que se incrementan los costos de producción y las cantidades de artículos que se deben ensamblar, la necesidad del *ensamble automatizado* es obvia. Los métodos de ensamble han mejorado mucho con el paso de los años, desde el ensamble a mano de los mosquetes de *partes intercambiables* de fines del siglo XVIII y principios del XIX.

La primera aplicación eficiente a gran escala fue el ensamble de imanes del volante de inercia del automóvil Ford Modelo T. Esta experiencia condujo en su momento a la producción en masa de vehículos. La elección de un método y sistema de ensamble depende de la tasa de producción que se requiere, la cantidad total que se va a producir, el ciclo de vida del producto, la disponibilidad de mano de obra y el costo.

Ensamble automatizado. Recuerde que las partes se manufacturan dentro de ciertos rangos de tolerancia dimensional. Si se toman como ejemplo los rodamientos de bolas, es bien sabido que aunque todos tengan las mismas dimensiones *nominales*, algunos de cada lote serán más pequeños que el resto, aunque en muy poca cantidad. Del mismo modo, algunas pistas de los baleros serán más chicas que otras del lote. Hay dos métodos de ensamble para tales productos de gran volumen.

En el **ensamble aleatorio** los componentes se colocan juntos al seleccionarlos al azar de los lotes producidos. En el **ensamble selectivo** se segregan las esferas y baleros (se separan) por grupos de tamaño, del más pequeño al más grande. Luego se seleccionan las partes para que concuerden; entonces, las esferas de diámetro más pequeño se acoplan con las pistas interiores que tienen los mayores diámetros externos y se hace lo mismo con los baleros externos con pistas internas más pequeñas.

Métodos y sistemas de ensamble. Hay tres métodos básicos de ensamble: manual, automático de alta velocidad y robótico; se usan individualmente o, como es el caso en la mayoría de las aplicaciones, en combinación. Como se aprecia en la figura 37.29, primero debe hacerse el análisis del diseño del producto para determinar un método de ensamble apropiado y económico:

1. El **ensamble manual** utiliza herramientas relativamente sencillas y por lo general es económico en lotes pequeños. Debido a la destreza de las manos y dedos humanos, y a su capacidad para la retroalimentación con varios sentidos, los trabajadores pueden ensamblar manualmente incluso partes complejas sin gran dificultad. (A pesar del uso de mecanismos sofisticados, robots y controles computarizados, la alineación y colocación de un simple marco cuadrado en un orificio cuadrado con poca holgura llega a ser una tarea difícil en el ensamble automático).
2. El **ensamble automatizado de alta velocidad** utiliza *mecanismos de transferencia* diseñados especialmente para el ensamble. En la figura 37.30 se presentan dos ejemplos, en los cuales se realiza el ensamble de productos *indexados* para su posicionamiento adecuado.
3. En el **ensamble robótico** operan uno o más robots de propósito general en una sola estación de trabajo (figura 37.31) o bien operan en un sistema de ensamble de estaciones múltiples.

Hay tres tipos básicos de sistemas de ensamble:

1. **Sistemas síncronos.** En estos sistemas de *indexación*, las partes individuales son suministradas y ensambladas a una tasa constante en estaciones individuales fijas. La tasa de movimiento de las piezas en este sistema se basa en la estación que requiere el mayor tiempo para completar su parte del ensamble. El sistema síncrono se usa sobre todo para ensamblar grandes volúmenes de productos pequeños a alta velocidad.



Código QR 37.3 Ensamble automatizado de una cámara digital con el empleo de robots industriales. (Fuente: © 2012, cortesía de ABB).

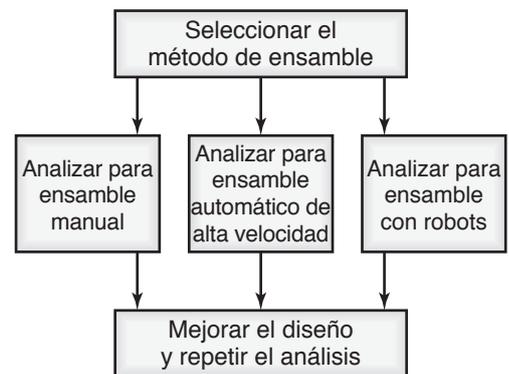


FIGURA 37.29 Etapas de diseño del análisis del ensamble. Fuente: Basado en G. Boothroyd y P. Dewhurst.

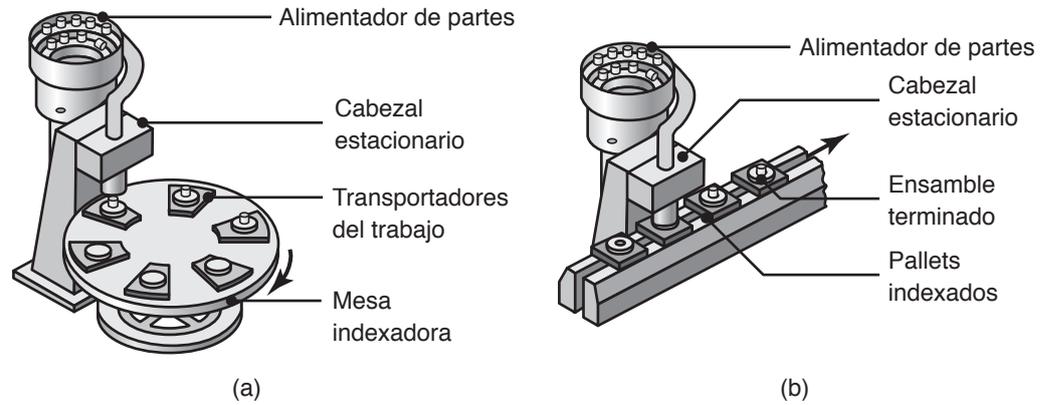


FIGURA 37.30 Sistemas de transferencia para el ensamble automático: (a) máquina indexadora rotatoria y (b) máquina indexadora en línea. Fuente: Basado en G. Boothroyd.

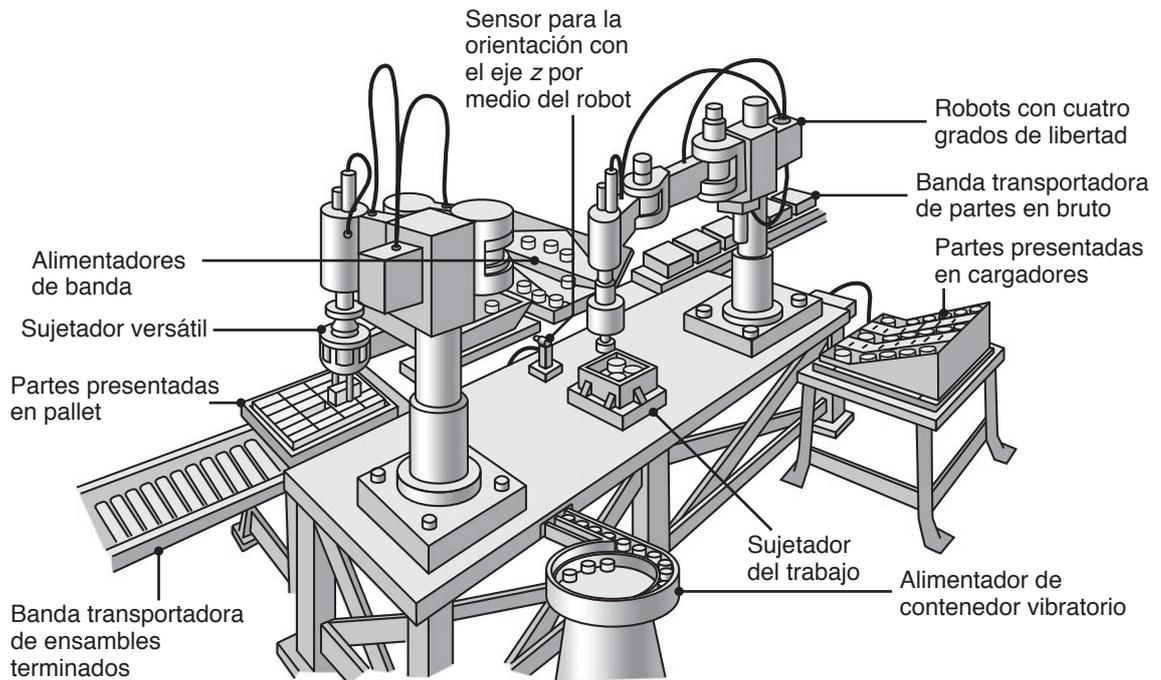


FIGURA 37.31 Estación de ensamble con un robot de dos brazos. Fuente: Basado en G. Boothroyd y P. Dewhurst.

Los *sistemas de transferencia* trasladan los ensambles parciales de una estación de trabajo a otra con varios medios mecánicos; en la figura 37.30 se muestran dos sistemas de transferencia comunes (*indexación rotatoria* e *indexación en línea*). Estos sistemas operan en modo completamente automático o semiautomático; sin embargo, observe que la falla de una estación detendrá toda la operación de ensamble.

Los *alimentadores de partes* proveen las partes individuales por ensamblar y las colocan en otros componentes, los cuales están montados en transportadores o sujetadores del trabajo. Los alimentadores llevan las partes individuales por medios vibratorios o de otro tipo a través de canales de distribución y aseguran su orientación apropiada por varios medios ingeniosos, algunos de los cuales se

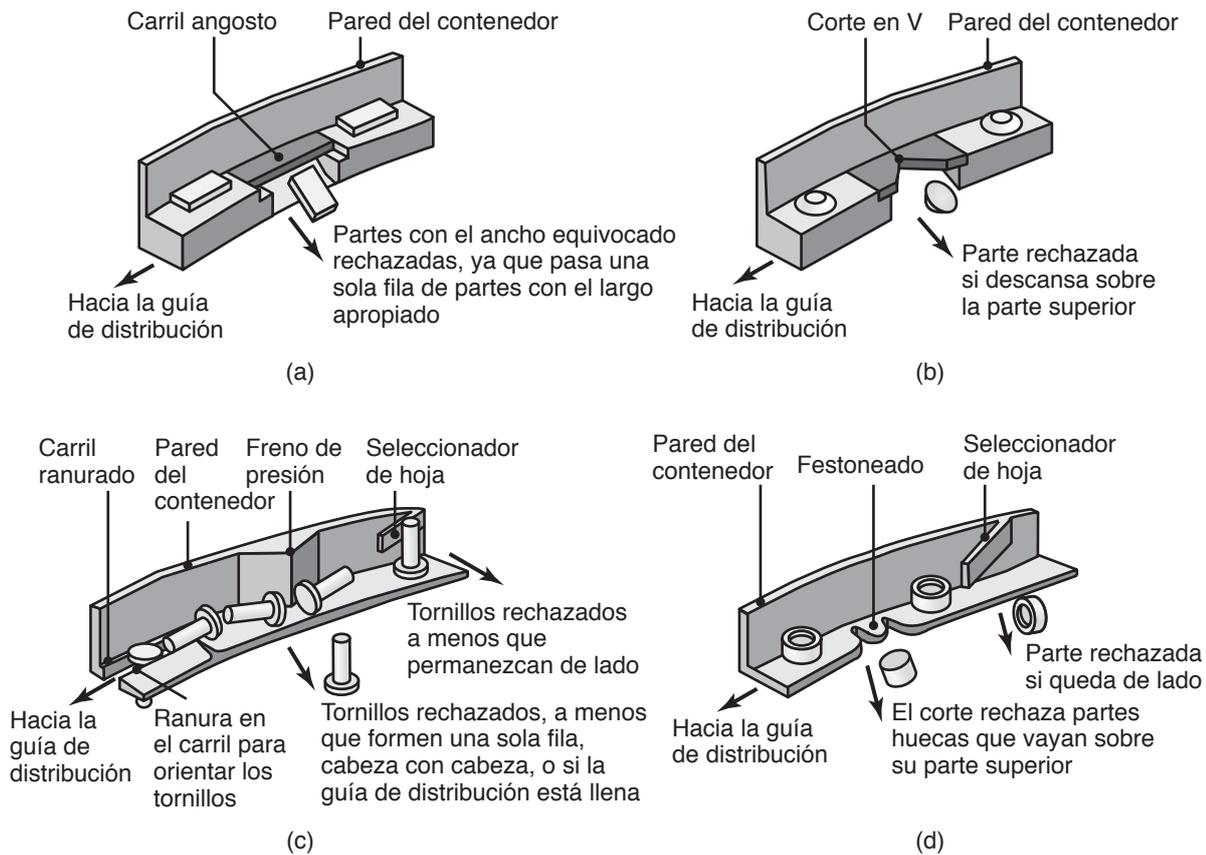


FIGURA 37.32 Ejemplos de guías que aseguran que las partes estén orientadas en forma apropiada para el ensamble automático. Fuente: Basado en G. Boothroyd.

muestran en la figura 37.32. En todas las operaciones de ensamble es esencial la orientación adecuada de las partes y evitar los atascos.

2. **Sistemas asincrónicos.** Cada estación opera en forma independiente y cualquier desbalance se acomoda en *reguladores* (almacenamiento) entre las estaciones. La estación opera hasta que el siguiente regulador está lleno o el anterior está vacío. Asimismo, si una estación queda fuera de operación, la línea de ensamble continúa operando hasta que se hayan utilizado todas las partes puestas en el regulador. Los sistemas asincrónicos son apropiados para ensambles grandes con muchas partes por ensamblar. Observe que si el tiempo requerido para las operaciones individuales de ensamble varía de manera significativa, la producción quedará restringida a la estación más lenta.
3. **Sistemas continuos.** El producto se ensambla mientras se desplaza a velocidad constante sobre bandejas o transportadores similares de la pieza de trabajo. Los componentes que se van a ensamblar se llevan al producto por diferentes medios y sus movimientos están sincronizados con el movimiento continuo del producto. Las aplicaciones comunes de este sistema ocurren en plantas embotelladoras y de empaque, aunque el método también se usa en líneas de producción en masa de automóviles y electrodomésticos.

Sistemas flexibles de ensamble. Por lo general, los sistemas de ensamble se preparan para una línea de producto específico. Sin embargo, se pueden modificar para tener mayor flexibilidad con el fin de ensamblar líneas de productos que tengan una diversidad en modelos de los artículos. Los *sistemas flexibles de ensamble* (FAS, por sus siglas en inglés)

utilizan controles computarizados, cabezales intercambiables y programables y dispositivos de alimentación, bandejas codificadas y equipos de guía automáticos. Este sistema es capaz, por ejemplo, de ensamblar hasta doce combinaciones diferentes de transmisión y motor y unidades de dirección con aire acondicionado.

37.10 Consideraciones de diseño para la sujeción, el ensamble, desensamble y servicio

Tal como sucede en muchos aspectos de la producción, el diseño de los dispositivos y sistemas descritos antes es parte integral de la operación total de manufactura.

37.10.1 Diseño para la sujeción

El diseño, la construcción y operación apropiados de dispositivos y accesorios flexibles de sujeción del trabajo son esenciales para la operación eficiente de sistemas de manufactura avanzada. Los principales aspectos del diseño involucrados son los siguientes:

- Los dispositivos de sujeción deben posicionar la pieza de trabajo automática y exactamente. Deben mantener su ubicación precisa y con suficiente fuerza de agarre para cumplir con los requerimientos de una operación de manufactura en particular. Los sujetadores también deben ser capaces de acomodar las partes repetidas veces en la misma posición.
- Los sujetadores deben tener rigidez suficiente para resistir, sin que sufran una distorsión excesiva, las fuerzas normal y cortante que se desarrollan en las interfaces de la pieza de trabajo y el dispositivo de sujeción.
- Un problema grave puede ser la existencia de un maquinado flojo o limaduras y otros residuos entre las superficies de localización de la pieza de trabajo y el sujetador. Es más probable que haya virutas donde se hayan utilizado fluidos de corte, ya que tienden a adherirse a las superficies húmedas debido a fuerzas de tensión superficial.
- Un sujetador flexible debe permitir el acomodo de las partes hechas con diferentes procesos y de las que tengan características dimensionales y de superficie que varíen de una parte a otra. Estas consideraciones son aún más importantes cuando la pieza de trabajo (a) es frágil o está hecha de un material frágil; (b) está fabricada con material relativamente suave y flexible, como termoplásticos y elastómeros, o (c) tiene un recubrimiento relativamente suave en sus superficies de contacto.
- Las mordazas y sujetadores deben tener perfiles bajos para evitar colisiones con las herramientas de corte. Evitar las colisiones es una consideración importante al programar las trayectorias de la herramienta en las operaciones de maquinado.
- La sujeción flexible debe cumplir los requerimientos especiales de las células de manufactura y los sistemas de manufactura flexible.
- Las piezas de trabajo deben diseñarse de modo que permitan la localización y agarre con el dispositivo de sujeción. En el diseño del producto deben incorporarse aletas, partes lisas u otras superficies de localización para simplificar el diseño del sujetador y ayudar a transferir la parte entre las diversas máquinas.

37.10.2 Diseño para el ensamble, desensamble y servicio

Diseño para el ensamble. Si bien el diseño del producto para la manufactura es un tema del mayor interés, el *diseño para el ensamble* (DFA, por sus siglas en inglés) ha concitado atención especial (en particular para el ensamble automatizado) debido a la necesidad de reducir sus costos. En el *ensamble manual*, una gran ventaja es que los humanos pueden tomar fácilmente las partes correctas del montón, o de un contenedor, orientarlas adecuadamente e insertarlas como se necesita. Sin embargo, en el *ensamble automático de alta velocidad* el manejo automatizado por lo general requiere que las partes se extraigan del

montón, se transporten por medio de tolvas o alimentadores vibratorios (figura 37.32) y se ensamben en las ubicaciones y orientaciones apropiadas.

En el ensamble se aplica con frecuencia el principio *poka-yoke*, término japonés que se refiere como “a prueba de errores” o “seguro contra fallas”. Este método también se aplica a los sistemas de manufactura esbelta (sección 39.6). Con respecto al ensamble, este principio sugiere que las operaciones de ensamble deben diseñarse de modo que sea improbable o incluso imposible que ocurran errores causados por el operador. Este método requiere la revisión de las operaciones de ensamble y la identificación de los problemas potenciales, así como las acciones correctivas pertinentes para minimizar los errores.

Algunos de los lineamientos generales para diseñar el ensamble se resumen como sigue:

1. Reducir el número y variedad de partes componentes de un producto. Simplificar el diseño del producto e incorporar funciones múltiples en una sola parte y diseñar las partes para que su inserción sea fácil. Usar partes comunes lo más posible. Considerar subensambles que sirvan como módulos.
2. Garantizar que las partes tengan un alto grado de simetría, ya sean redondeadas o cuadradas, o sean muy asimétricas, ovales o rectangulares, de manera que no se puedan instalar incorrectamente y no requieran de ubicación, alineación y ajuste.
3. Los diseños deben permitir que las partes se ensamben sin obstrucciones. Debe haber una línea directa de visión. Los ensambles no se tienen que girar para realizar la inserción de los componentes.
4. Considere métodos como ajustes de presión (vea la figura 32.19) para no tener la necesidad de sujetadores como remaches, tuercas y tornillos. Si se usan sujetadores debe minimizarse su variedad y espaciarlos y ubicarlos de modo que se puedan usar herramientas sin que haya obstrucciones.
5. Los diseños de las partes deben tomar en cuenta factores como tamaño, forma, peso, flexibilidad, abrasión y posibles enredos con otras partes.
6. El ensamble desde dos o más direcciones puede ser difícil. Las partes deben insertarse desde una sola dirección, de preferencia verticalmente y desde arriba para aprovechar las ventajas de la gravedad.
7. Los productos deben diseñarse, o rediseñar los artículos ya existentes, de modo que no haya obstrucciones físicas para el libre movimiento de las partes durante el ensamble. Por ejemplo, las esquinas agudas externas o internas deben reemplazarse con chaflanes, formas cónicas o radiales.
8. Deben emplearse códigos de color en las partes de apariencia semejante pero que sean diferentes. También deben asignarse letras u otros símbolos para garantizar la identificación correcta de la parte.

Ensamble con robots. Los lineamientos de diseño para el ensamble robótico incluyen las consideraciones adicionales siguientes:

- Las partes deben diseñarse de modo que el sujetador del robot las pueda tomar y manipular. Las partes deben ponerse a disposición del sujetador en la orientación correcta.
- El ensamble que involucra sujetadores roscados (armellas, tuercas y tornillos) puede ser difícil de llevar a cabo con robots; una excepción es el uso de tornillos autorroscables para placas metálicas, plásticos y partes de madera. Observe que los robots manipulan con facilidad ajustes de presión, pernos, soldaduras y adhesivos. Los avances en los efectores de compensación final y manipuladores diestros han hecho que el ensamble robótico sea aún más atractivo.

Evaluación de la eficiencia del ensamble. Para evaluar la *eficiencia del ensamble* se considera cada uno de sus componentes con respecto a aquellas de sus características que pueden afectar tanto al ensamble como el tiempo estimado requerido para incorpo-

rar la parte en el ensamble. Tenga presente que también es posible medir la eficiencia del ensamble para los productos existentes. La eficiencia del ensamble, η , está dada por

$$\eta = \frac{Nt}{t_{\text{tot}}}, \quad (37.1)$$

donde N es el número de partes, t_{tot} es el tiempo total del ensamble y t es el tiempo ideal del ensamble de una parte pequeña que no presente dificultades en su manejo, orientación o ensamble; es común que t se tome como de 3 segundos. Los diseños en competencia deben evaluarse con base en la ecuación (37.1) con respecto a su diseño para el ensamble. Se ha observado que los productos que necesitan rediseñarse para facilitar su ensamble, suelen tener eficiencias de alrededor de 5 a 10%, en tanto que las partes bien diseñadas tienen eficiencias cercanas a 25 por ciento.

Diseño para el desensamble. La manera y facilidad con que un producto se puede desarmar para recibir mantenimiento o sustituir sus partes es otra consideración importante en su diseño. Por ejemplo, recuerde las dificultades que se presentan para retirar ciertos componentes del cofre de algunos automóviles; hay dificultades semejantes en el desensamble de otros y numerosos aparatos y productos.

El método general del *diseño para el desensamble* requiere tomar en cuenta factores que son similares a los del diseño para el ensamble. El análisis de modelos de computadora o físicos de los productos y sus componentes, con miras al desensamble, por lo general resalta cualesquiera problemas potenciales, como obstrucciones, tamaño de los pasajes, falta de una línea visual y la dificultad de sujetar con firmeza para guiar los componentes.

Un aspecto importante del diseño para el desensamble es la manera en que, al concluir su ciclo de vida (vea la sección 40.4), se va a desarmar un producto para el reciclaje, en especial para rescatar sus componentes más valiosos. Por ejemplo, observe que, en función de su diseño y ubicación, del tipo de herramientas usadas y si fueron manuales o movidas con energía: (a) para ser retirados, los remaches requerirán más tiempo que los tornillos o los ajustes de presión y (b) una capa de material valioso pegada con adhesivos a un componente sería muy difícil, o imposible, de retirar para su reciclaje o reutilización.

Es obvio que cuanto más tiempo lleve separar los componentes, más alto es el costo de hacerlo. Entonces, es posible que este costo se vuelva prohibitivo; en consecuencia, el tiempo necesario para el desensamble también tiene que estudiarse y medirse. Aunque dicho tiempo depende de la manera en que se efectúa el desensamble, algunos ejemplos son (a) cortar alambre en 0.25 s; (b) desconectar cables en 1.5 s; (c) separar ajustes de presión y sujetadores en 1 a 3 s y (d) aflojar tornillos y remaches de máquina en 0.15 a 0.6 s por revolución. Por supuesto, estas cantidades dependen del nivel de automatización empleado.

Diseño para el servicio. El *diseño para el servicio* se basa esencialmente en el concepto de que los elementos que es más probable necesiten servicio se localicen en las capas *exteriores* del producto. De esta forma, las partes individuales son más fáciles de alcanzar para darles servicio, sin que haya necesidad de retirar otras partes para hacerlo. Por tanto, el diseño para el ensamble y desensamble debe tomar en cuenta la facilidad con que el producto puede recibir mantenimiento y, de ser necesario, reparación.

37.11 Consideraciones económicas

Como se describe con más detalle en el capítulo 40, y se ha visto en muchos capítulos de este libro, hay numerosas consideraciones implicadas en la determinación del conjunto de la *economía de la producción*. Debido a que todos los sistemas productivos son en esencia combinaciones de máquinas y personas, entre los factores importantes que influyen en las decisiones finales se incluyen los siguientes:

- Tipo y costo de la maquinaria, equipo y herramienta.
- Costo de operación de la maquinaria.
- Nivel y cantidad de la habilidad de la mano de obra requerida.
- Cantidad de producción deseada.

También recuerde que el tamaño del lote y la tasa de producción influyen mucho en la economía de la producción. Las cantidades pequeñas por año se pueden producir en talleres. Sin embargo, el tipo de maquinaria en los talleres por lo general requiere mano de obra hábil y la cantidad y tasa de producción son bajas; como resultado, el costo por parte es elevado. Del mismo modo, las instalaciones para hacer prototipos rápidos se pueden utilizar para hacer corridas de producción bajas y son más rentables si los requerimientos de material son compatibles con la secuencia del procesamiento.

En el otro extremo se encuentra la producción de cantidades muy grandes, usando líneas convencionales de flujo y transferencia, y el empleo de maquinaria y equipo de propósito especial, herramientas especializadas y sistemas de control computarizado. Aunque todos estos componentes constituyen inversiones grandes, tanto el nivel de habilidad requerido como los costos de la mano de obra son relativamente bajos debido al alto nivel de automatización implementado. Sin embargo, estos sistemas de producción están organizados para un tipo específico de producto, por lo que carecen de flexibilidad.

Debido a que la mayor parte de operaciones de manufactura se hallan entre los dos extremos mencionados, debe tomarse la decisión apropiada acerca del nivel óptimo de automatización por implementar. En muchas situaciones es más rentable la automatización selectiva en lugar de automatizar totalmente las instalaciones.

RESUMEN

- Se ha implementado en forma creciente la automatización en los procesos de manufactura, manejo de materiales, inspección, ensamble y empaque. Hay varios niveles de automatización, que van de la sencilla para las máquinas a las células de manufactura sin operadores humanos.
- La verdadera automatización comenzó con las máquinas de control numérico, lo que ofrece flexibilidad de operación, menor costo y facilidad de fabricación de partes diferentes con menos habilidad del operador. La cantidad y tasa de producción son factores importantes para determinar los niveles rentables de automatización.
- Las operaciones de manufactura se optimizan aún más, tanto en calidad como en costo, por medio de técnicas de control adaptativo que monitorean continuamente una operación y hacen con rapidez los ajustes necesarios a los parámetros de procesamiento.
- En el manejo de materiales se han hecho avances importantes, en particular con la implementación de robots industriales y vehículos guiados automáticamente.
- Los sensores son esenciales en la implementación de tecnologías modernas; se ha desarrollado e instalado una gran variedad de sensores basados en diferentes principios.
- Hay avances adicionales que incluyen técnicas de sujeción flexible y de ensamble automatizado que reducen la necesidad de intervención del trabajador, así como los costos de manufactura. Su eficacia e implementación económica requieren que se reconozca que el diseño para el ensamble, desensamble y servicio es un factor importante en el diseño total y las operaciones de manufactura.
- La implementación eficiente y económica de estas técnicas también requiere que el diseño para el ensamble, desensamble y servicio se reconozca como elemento importante de la manufactura.

TÉRMINOS CLAVE

Automatización	Ensamble	Percepción visual	Sistemas flexibles de ensamble
Automatización dura	Ensamble aleatorio	Percepción táctil	Sujeción flexible
Automatización selectiva	Ensamble selectivo	Poka-Yoke	Trayectoria continua
Automatización suave	Envolvente de trabajo	Posicionamiento	Unidades de producción con cabezal de potencia
Contorneado	Fijación de tipo columna	Productividad	Vehículo guiado
Control adaptativo	Fusión de sensores	Programación de partes	automáticamente
Control de lazo abierto	Interpolación	Regulador	Visión computarizada
Control de lazo cerrado	Lenguaje de programación	Repetibilidad	Visión de máquina
Control numérico	Líneas de transferencia	Resolución	
Control numérico computarizado	Manejo del material	Retroalimentación	
Controlador programable	Manipuladores	Robot	
Controles de hardware	Mantenimiento productivo total	Robot industrial	
Efactor final	Máquinas especializadas	Robot inteligente	
Efectores de compensación final	Máquinas independientes	Sensores	
	Mecanización	Sensores inteligentes	
		Sistemas de control	

BIBLIOGRAFÍA

- Batchelor, B. G. (ed.), *Machine Vision Handbook*, Springer, 2012.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P. y Knight, W. A., *Product Design for Manufacture and Assembly*, 3a. ed., CRC Press, 2010.
- Craig, J. J., *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3a. ed., Prentice Hall, 2004.
- Davies, E. R., *Computer and Machine Vision*, 4a. ed., Academic Press, 2012.
- Fraden, J., *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 4a. ed., Springer, 2010.
- Hornberg, A., *Handbook of Machine Vision*, Wiley, 2007.
- Ioannu, P. A., *Robust Adaptive Control*, Prentice Hall, 1995.
- Kandray, D., *Programmable Automation Technologies: An Introduction to CNC, Robotics and PLCs*, Industrial Press, 2010.
- Kurfess, T. R. (ed.), *Robotics and Automation Handbook*, CRC Press, 2004.
- Mitchell, H. B., *Multi-Sensor Data Fusion: An Introduction*, Springer, 2007.
- Quesada, R., *Computer Numerical Control Machining and Turning Centers*, Prentice Hall, 2004.
- Rehg, J. A., *Introduction to Robotics in CIM Systems*, 5a. ed., Prentice Hall, 2002.
- Smid, P., *CNC Programming Handbook*, 2a. ed., Industrial Press, 2002.
- Snyder, W. E. y Qi, H., *Machine Vision*, Cambridge University Press, 2010.
- Soloman, S., *Sensors Handbook*, McGraw-Hill, 2009.
- Stenerson, J. y Curran, K. S., *Computer Numerical Control: Operation and Programming*, 3a. ed., Prentice Hall, 2006.
- Valentino, J. V. y Goldenberg, J., *Introduction to Computer Numerical Control*, 5a. ed., Prentice Hall, 2012.
- Zhang, J., *Practical Adaptive Control: Theory and Applications*, VDM Verlag, 2008.

PREGUNTAS DE REPASO

- 37.1** Describa las diferencias entre mecanización y automatización.
- 37.2** Explique la diferencia entre la automatización dura y la suave. ¿Por qué se llaman así?
- 37.3** ¿Qué es productividad? ¿Por qué es importante?
- 37.4** Explique la diferencia entre una línea de manufactura flexible y una línea de transferencia.
- 37.5** Describa los principios de las máquinas de control numérico.
- 37.6** Explique los circuitos de control de lazo abierto y de lazo cerrado.
- 37.7** Describa el principio y los propósitos del control adaptativo.
- 37.8** ¿Qué factores llevaron al desarrollo de vehículos guiados automáticamente?
- 37.9** ¿Qué es un sistema de control punto a punto? ¿En qué se distingue de un sistema de contorno?
- 37.10** Describa las características de un robot industrial. ¿Por qué son necesarias dichas características?
- 37.11** Haga una lista de los principios de varios tipos de sensores y descríbalos.
- 37.12** Describa el concepto de diseño para el ensamble. ¿Por qué se ha convertido en un factor importante para la manufactura?

- 37.13** ¿Es posible tener automatización parcial en un ensamble? Explique.
- 37.14** Explique las ventajas de la sujeción flexible.

- 37.15** ¿Cómo se programan los robots para que sigan cierta trayectoria?
- 37.16** ¿Qué clase de efectores finales existen para los robots?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 37.17** (a) ¿Por qué por lo general se considera a la automatización como evolucionaria, en vez de revolucionaria? (b) Explique por qué sería difícil justificar la automatización para pequeñas corridas de producción.
- 37.18** ¿Hay actividades de las operaciones de manufactura que no se puedan automatizar? Explique.
- 37.19** ¿Qué es un controlador lógico programable? ¿Por qué son populares?
- 37.20** Explique los factores que han llevado al desarrollo del control numérico.
- 37.21** Con ejemplos específicos exponga sus observaciones sobre la pregunta 37.2.
- 37.22** ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones relativas de los dos arreglos de cabezales de potencia que se ilustran en la figura 37.4?
- 37.23** Analice los métodos de hacer mediciones en línea de los diámetros de las piezas de trabajo en operaciones de torneado, distintos de los que se ilustran en la figura 37.15.
- 37.24** ¿Son el taladrado y el barrenado las únicas aplicaciones del sistema punto a punto que se ilustra en la figura 37.10a? Explique.
- 37.25** Si se conocen tres puntos sobre una línea recta, ¿es mejor usar interpolación lineal o circular? Explique su respuesta.

- 37.26** ¿Qué es lo que determina el número de robots a incluir en una línea de ensamble automatizada como la que se ilustra en las figuras 37.22a y 37.30?
- 37.27** Describa situaciones en las que la forma y el tamaño de la envoltura de trabajo de un robot (figura 37.21) sea crítica.
- 37.28** Explique la diferencia entre un vehículo guiado automatizado y uno autoguiado.
- 37.29** Explique por qué los sensores se han vuelto esenciales en el desarrollo de sistemas de manufactura automatizados.
- 37.30** La tabla 37.2 muestra algunos ejemplos de productos comunes de cada categoría. Agregue varios ejemplos.
- 37.31** Elabore una lista de aplicaciones de robots industriales.
- 37.32** ¿Qué significa la expresión fusión de sensores?
- 37.33** Describa aplicaciones de la visión de máquina para partes específicas que sean semejantes a las que se ilustran en la figura 37.26.
- 37.34** ¿Qué es una sujeción de tipo columna?
- 37.35** Dibuje el espacio (envoltura) de trabajo de los robots que se muestran en la figura 37.20.
- 37.36** Enumere las ventajas y desventajas del filtrado modular.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

- 37.37** Un ensamble de husillo-freno utiliza las partes siguientes: husillo de acero, dos bujes de nailon, un soporte de acero estampado y seis tornillos con seis tuercas para sujetar los bujes de nailon al soporte de acero y por tanto al husillo. Compare este ensamble con el de husillo-soporte que se ilustra en el problema 16.65 y estime la eficiencia del ensamble de cada diseño.
- 37.38** Desarme un bolígrafo sencillo. Mida con cuidado el tiempo que le lleva volverlo a armar y calcule la eficiencia de ensamble. Repita el ejercicio para un lapicero.

- 37.39** Examine la figura 37.11b y obtenga una expresión para calcular el máximo error al aproximar un círculo con incrementos lineales, como función del radio del círculo y el número de incrementos en la circunferencia del círculo.
- 37.40** Revise el ejemplo 14.1 y desarrolle ecuaciones para la fuerza, con sistemas de control de lazo abierto y de lazo cerrado, si el coeficiente de fricción es μ .

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

- 37.41** Consulte la parte III de este libro y dé un ejemplo de operación de formado de metal que sea apropiada para el control adaptativo.
- 37.42** Describa posibles aplicaciones de los robots industriales que no se hayan visto en este capítulo.
- 37.43** Diseñe dos diferentes sistemas de sujetadores mecánicos para dos aplicaciones que sean muy distintas.
- 37.44** Proporcione algunas aplicaciones para los sistemas que se muestran en las figuras 37.26a y c.

- 37.45** Para un sistema similar al mostrado en la figura 37.28, diseñe un esquema de sujeción flexible para el plato de sujeción de un torno.
- 37.46** Dé ejemplos de productos que sean apropiados para los tres tipos de producción ilustrados en la figura 37.3.
- 37.47** Describa situaciones en las que no serían apropiados sensores táctiles. Explique por qué.
- 37.48** ¿Hay situaciones en las que no pueda aplicarse la visión de máquina en forma apropiada y confiable? Explique.

37.49 Escoja una máquina de cada una de las partes II a IV y diseñe un sistema en el que se pueda usar con eficacia la fusión de sensores.

37.50 Piense en un producto y diseñe una línea de transferencia para él que sea similar a la que se ilustra en la figura 37.5. Especifique los tipos y el número de máquinas requeridas.

37.51 Describa sus reflexiones acerca de la utilidad y aplicaciones de una sujeción modular que consiste en varias mordazas individuales, pernos, apoyos y accesorios montados sobre una placa base.

37.52 Inspeccione varios productos domésticos y describa la manera en la que han sido ensamblados. Comente cualesquiera cambios en el diseño del producto que usted haría con el fin de que el ensamble, desensamble y servicio sean más sencillos y rápidos.

37.53 Revise la tabla 37.1 acerca de la historia de la automatización y describa sus reflexiones sobre los nuevos desarrollos que habría que agregar al final de la lista para el futuro cercano.

37.54 Diseñe el sujetador de un robot que fuera a tomar y colocar lo siguiente: (a) huevos; (b) un objeto hecho de caucho espumoso; (c) una esfera de metal con una superficie muy lisa y pulida; (d) un periódico y (e) utensilios de mesa tales como cuchillos, cucharas y tenedores.

37.55 Diseñe un efector final que sujete y coloque (a) un malvavisco en forma de huevo y (b) un fundido de acero en forma de huevo.

37.56 Revise las especificaciones de varias máquinas de control numérico y haga una lista de números normales para su (a) exactitud de posicionamiento, (b) repetibilidad y (c) resolución. Comente sus observaciones.

37.57 Describa los sensores que usted utiliza en un acto sencillo, como caminar o lanzar una pelota.

37.58 Proporcione un ejemplo de cada una de las reglas de diseño descritas en la sección 37.10.2.

37.59 Consiga un tostador antiguo y desármelo. Explique cómo haría para volverlo a armar por medio de ensamble automático.

37.60 Organice una búsqueda de bibliografía en internet sobre productos de cuatro clases de escáneres tridimensionales. Compare el precio y las capacidades de cada uno.

37.61 Suponga que se le pide aplicar un examen sobre el contenido de este capítulo a los estudiantes. Prepare cinco problemas cuantitativos y cinco preguntas cualitativas y proporcione las respuestas.

Manufactura asistida por computadora

CAPÍTULO 38

- Las computadoras han cambiado fundamentalmente el diseño de producto y la empresa manufacturera; ahora existe paquetería (software) computacional muy poderosa para asistir e integrar todas las tareas de ingeniería.
- Este capítulo se inicia con una descripción del diseño asistido por computadora, en el cual se crea y almacena en el software la descripción gráfica de las partes.
- Después se estudia el uso de las computadoras en el control directo de los procesos de manufactura y en la manufactura asistida por computadora.
- Posteriormente, en el capítulo se describe la forma en que el software permite simular los procesos y sistemas de manufactura.
- Por último se presenta la descripción de la tecnología de grupos, un método que con frecuencia se lleva a cabo en software de CAD, lo que permite la recuperación rápida de las experiencias anteriores de diseño y manufactura, y que es una herramienta esencial para el análisis del flujo de la producción.

38.1	Introducción	1101
38.2	Sistemas de manufactura	1102
38.3	Manufactura integrada por computadora	1102
38.4	Diseño e ingeniería asistidos por computadora	1105
38.5	Manufactura asistida por computadora	1110
38.6	Planeación del proceso asistida por computadora	1110
38.7	Simulación en computadora de los procesos y sistemas de manufactura	1113
38.8	Tecnología de grupos	1114

38.1 Introducción

En el capítulo 36 se hizo énfasis en la importancia de la calidad del producto, así como en la necesidad del compromiso de la compañía con respecto a la administración total de la calidad. Recuerde también los enunciados acerca de que *la calidad debe construirse en el producto*, que la alta calidad no necesariamente significa mayores costos, y que en realidad comercializar productos de mala calidad es muy costoso para el fabricante.

La alta calidad es mucho más accesible y menos costosa si se integran apropiadamente las actividades de diseño y manufactura, en vez de tratarlas como actividades separadas. La integración se puede llevar a cabo con éxito y eficacia a través de *diseño, manufactura, planeación y simulación de los procesos y sistemas asistidos por computadora*, como se describe a lo largo de este capítulo. La gran disponibilidad de computadoras de alta velocidad y software poderoso ha permitido que las computadoras proliferen en todas las áreas de la manufactura.

La tecnología computacional predomina y está presente en muchos niveles. Una parte de la geometría puede programarse en software CAD, el cual es en sí mismo un programa computacional muy complejo. Por ejemplo, la manufactura de una parte se puede realizar programándola en código G (sección 37.3.6), que usa otro programa también complejo para traducir instrucciones geométricas a las acciones de la máquina. Hay software disponible y con poder suficiente para integrar el diseño con actividades de programación de control numérico computarizado (CNC) y, con ello, facilitar el proceso del diseño y la manufactura. De este modo, cada aspecto de la labor de ma-

EJEMPLO:

38.1	Simulación de la manufactura a escala de la planta	1113
------	--	------

nufactura moderna está asociado hoy con computadoras y software, y es posible la integración de todo el negocio a través de estándares (normas) de comunicación.

38.2 Sistemas de manufactura

La manufactura es un *sistema* complejo, ya que consiste en muchos y diversos elementos físicos y humanos. Algunos de dichos elementos son difíciles de predecir y controlar debido a factores como el suministro y el costo de las materias primas, el efecto de tecnologías en continuo desarrollo, cambios en los mercados globales y el comportamiento y desempeño humano. Idealmente, un sistema de manufactura debe representarse con modelos matemáticos y físicos que muestren la naturaleza y el grado de interdependencia de todas las variables relevantes. De esta manera, se pueden analizar los efectos de un cambio o perturbación que suceda en cualquier parte del sistema y así hacer los ajustes necesarios y oportunos.

Por ejemplo, el suministro de una materia prima en particular disminuye de manera significativa debido a las demandas globales o por razones geopolíticas. A consecuencia de esto el costo de la materia prima subirá (oferta y demanda), y entonces habrá que considerar y seleccionar materiales alternativos. La selección debe hacerse después de un análisis cuidadoso de varios factores, ya que un cambio de tal magnitud podría tener efectos adversos en la calidad del producto, la tasa de producción y los costos de manufactura. Por ejemplo, el material seleccionado podría no ser tan fácil de moldear, maquinar o soldar, con lo que disminuiría la integridad del producto.

En un mercado global en cambio constante, la demanda de un producto también fluctúa aleatoria y rápidamente por varias razones. Como ejemplos, considere la disminución en el tamaño de los automóviles en respuesta a los costos crecientes de los combustibles, el aumento en popularidad de los vehículos híbridos con sistemas de propulsión a gas-electricidad, los que incorporan celdas de combustible y los autos eléctricos. El sistema de manufactura debe ser capaz de producir el artículo modificado en un tiempo relativamente corto mientras que minimiza grandes gastos en la maquinaria nueva y el herramental que se requerirán.

La complejidad de dicho sistema es difícil de analizar y modelar, sobre todo por la falta de entendimiento y confiabilidad en los datos de todas las variables involucradas. Además, es difícil predecir y controlar de manera correcta algunas de estas variables, ya que (a) los costos de las materias primas son difíciles de pronosticar con precisión; (b) no es posible modelar con detalle las características de las máquinas herramienta, su rendimiento y respuesta a las perturbaciones aleatorias del exterior, y (c) el comportamiento y desempeño humanos son aún más difíciles de modelar.

38.3 Manufactura integrada por computadora

La *manufactura integrada por computadora* (CIM, por sus siglas en inglés,) implica la integración computarizada de todos los aspectos de diseño, planeación del proceso, producción y distribución del producto, así como la administración y operación de toda la organización de manufactura. La CIM es una *metodología* y su efectividad depende en forma crítica del uso de un *sistema de comunicaciones integrado a gran escala*, que consiste en computadoras, máquinas y sus controles, como se describe en la sección 39.7. Debido a que la metodología CIM idealmente debería involucrar el total de las operaciones de una organización, requiere una *base de datos* extensa concerniente a los aspectos técnicos y de negocios de la operación. En consecuencia, si se planea por completo en una sola ocasión, la metodología CIM sería prohibitivamente cara, en particular para compañías pequeñas y medianas.

Así, resulta esencial efectuar una *planeación estratégica* exhaustiva y de gran visión que cubra todas las fases de la operación con el fin de que ésta se beneficie totalmente de la metodología CIM. Dicha planeación y el nivel de integración deben tomar en cuenta consideraciones como (a) la misión, metas y cultura de la organización; (b) disponibilidad de los recursos financieros, técnicos y humanos, y (c) las tecnologías existentes y emergentes en las áreas de los productos que se han de manufacturar.

Subsistemas de la metodología CIM. Los sistemas de la manufactura integrada por computadora comprenden los subsistemas siguientes, los cuales se integran como un todo (figura 38.1):

1. Planeación y apoyo del negocio.
2. Diseño del producto.
3. Planeación del proceso de manufactura.
4. Automatización y control del proceso.
5. Sistemas de monitoreo de la producción.

Los subsistemas se diseñan, desarrollan e implementan de tal manera que la salida de uno sirva como la entrada de otro. Organizacionalmente, los subsistemas por lo general se dividen en dos funciones:

- **Funciones de planeación del negocio:** pronósticos, calendarización, planeación de requerimientos de material, facturación y contabilidad.
- **Funciones de ejecución del negocio:** control de la producción y del proceso, manejo de materiales, pruebas e inspección del sistema.

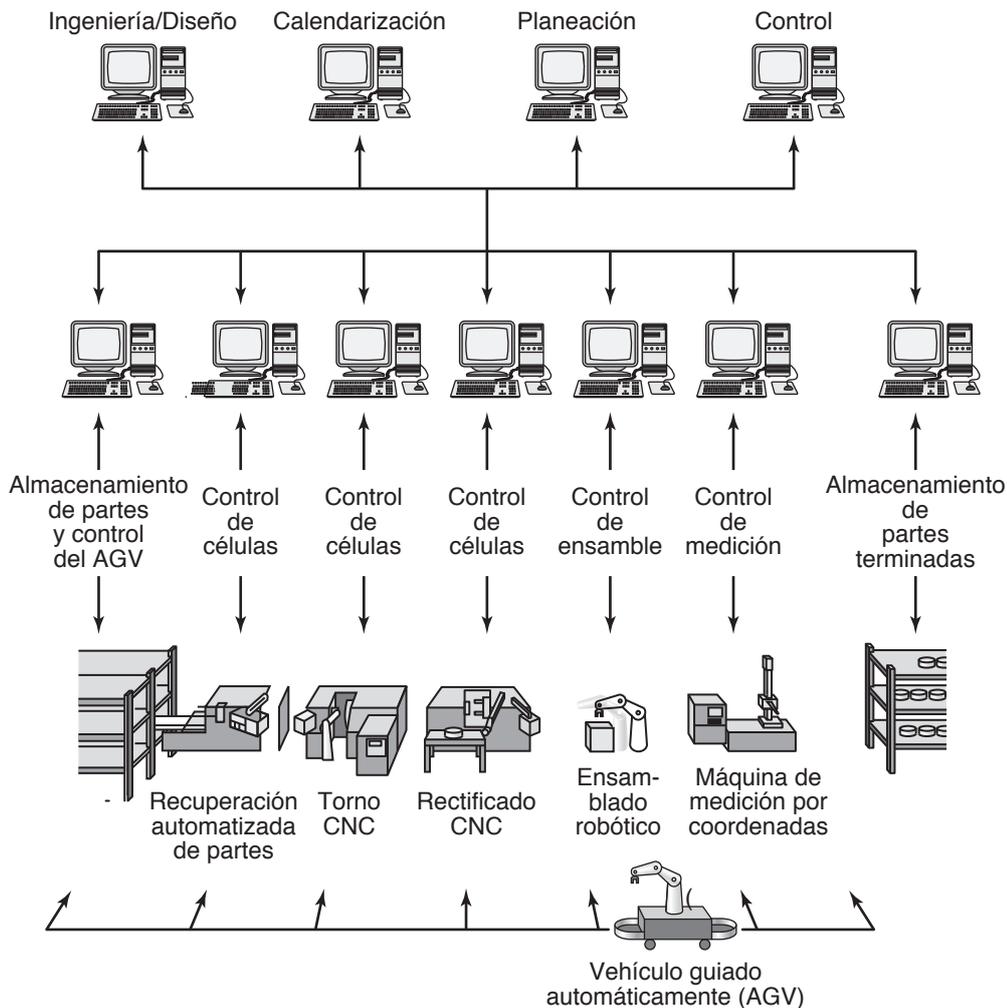


FIGURA 38.1 Ilustración esquemática de un sistema de manufactura integrada por computadora; las células de manufactura y sus controles que aparecen en la parte inferior izquierda se describen en la sección 39.2. Fuente: Basado en U. Rembold.

Si se implementan de modo apropiado, los beneficios principales de la metodología CIM son:

- Énfasis en la *calidad del producto* y la uniformidad por medio de un mejor control del proceso.
- Uso *eficiente* de materiales, maquinaria y personal y una importante reducción del inventario en proceso, todo lo cual mejora la productividad y disminuye el costo del producto.
- *Control total* de la producción, calendarización y administración de toda la operación de manufactura.
- *Atención* a ciclos más cortos de la vida del producto, demandas cambiantes del mercado y competencia global.

38.3.1 Base de datos

Las bases de datos consisten en información actualizada, detallada y exacta que se relaciona con diseños, productos, procesos, materiales, maquinaria, producción, finanzas, compras, ventas y marketing. Esta vasta cantidad de información se guarda en la memoria de una computadora y se consulta o modifica cuando es necesario, ya sea por el personal de la organización o por el sistema CIM directamente. Un sistema eficiente con la metodología CIM requiere *una sola base de datos* que comparta toda la organización de manufactura.

Es común que una base de datos consista en los siguientes elementos, algunos de los cuales se clasifican como técnicos y otros como no técnicos:

- **Datos del producto:** forma, dimensiones y especificaciones de la parte.
- **Atributos de la administración de datos:** número de parte y nivel de revisión, inclusive descripciones o palabras clave que ayuden a recuperar datos.
- **Datos de producción:** procesos de manufactura empleados.
- **Datos operativos:** calendarización, tamaños de lote y requerimientos de ensamble.
- **Datos de recursos:** capital, máquinas, equipo, herramientas, personal y sus habilidades.

Las bases de datos las compila personal de la organización con entradas desde varios sensores instalados en la maquinaria de producción y equipo. Los datos se obtienen en forma automática mediante un **sistema de adquisición de datos** (DAS, por sus siglas en inglés), el cual da seguimiento al número de partes que se producen por unidad de tiempo y su exactitud dimensional, acabado de la superficie, peso y otras características, con tasas especificadas de muestreo. Los componentes del DAS incluyen microprocesadores, transductores y convertidores de analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés). Los sistemas de adquisición de bases de datos también son capaces de analizar datos y transferirlos a otras computadoras con propósitos de análisis estadísticos, presentación de datos y pronóstico de demanda del producto.

En el uso e implementación de las bases de datos son varios los factores importantes:

1. Deben ser oportunas, exactas, de fácil acceso, fáciles de compartir y amigables con el usuario.
2. Debido a que se usan para varios propósitos y por muchas personas de la organización, las bases de datos deben ser flexibles y responder a las necesidades de los diferentes usuarios.
3. A los sistemas con la metodología de manufactura integrada por computadora pueden acceder diseñadores, ingenieros de manufactura, planificadores del proceso, funcionarios financieros y la dirección de la empresa a través de códigos apropiados de acceso; las compañías deben proteger los datos contra alteraciones o uso no autorizado.
4. Si surgen problemas con la exactitud o pérdida de datos, los correctos deben recuperarse y restaurarse.

38.4 Diseño e ingeniería asistidos por computadora

El *diseño asistido por computadora* (CAD, por sus siglas en inglés) implica el uso de computadoras para crear planos del diseño y modelos del producto (vea también la figura I.10 en la introducción general). El CAD se asocia generalmente con **gráficas interactivas de computadora**, conocidas como **sistema CAD**. Estos sistemas son herramientas poderosas y se emplean en el diseño y modelado geométrico de componentes y productos. En un monitor de computadora el diseñador puede conceptualizar con facilidad la parte que se va a diseñar y considerar diseños alternativos o modificar uno en particular para responder con rapidez a los requerimientos del diseño.

En el comercio existen varios programas poderosos para ayudar a los diseñadores en la descripción geométrica y el análisis de ingeniería, como SolidWorks, ProEngineer, CATIA, AutoCAD, Solid Edge y Vector Works. El software o paquetes computacionales ayudan a identificar problemas potenciales, como cargas excesivas, deflexiones o interferencias entre las superficies de contacto cuando se encuentren durante los ensambles. En la base de datos CAD también se guarda información como la lista de materiales y especificaciones e instrucciones de manufactura. Al usar esta información, el diseñador del producto puede analizar la economía de la manufactura de diseños alternativos.

La **ingeniería asistida por computadora** (CAE, por sus siglas en inglés) permite que varias aplicaciones compartan la información de la base de datos. Estas aplicaciones incluyen, por ejemplo, (a) análisis de esfuerzos con el método del elemento finito, deformaciones, deflexiones y distribución de la temperatura en las estructuras, así como las cargas en los miembros; (b) generación, almacenamiento y recuperación de datos de control numérico (NC) y (c) diseño de circuitos integrados y de diversos dispositivos electrónicos.

38.4.1 Especificaciones para el intercambio

Debido a la existencia de una gran variedad de sistemas CAD con diferentes características provistos por distintos vendedores, es esencial que haya una comunicación e intercambio de datos eficaz entre estos sistemas. El **formato de intercambio de planos** (DFX, por sus siglas en inglés) se desarrolló para usarlo con *Autodesk*[®] y aún es operativo, pero ha sido superado por el formato de archivos DWG. Los formatos de estereolitografía (STL) se usan para exportar geometrías tridimensionales, al principio se utilizaban sólo para *sistemas de prototipos rápidos* (capítulo 20), pero ahora se han convertido en un formato útil para intercambiar datos entre distintos sistemas CAD.

La necesidad de contar con un formato neutro único para tener mejor compatibilidad y transferir más información que únicamente la geométrica, actualmente se cubre sobre todo con la **Especificación de Intercambio de Gráficas Inicial** (IGES, por sus siglas en inglés). Este formato se utiliza para traducir en dos direcciones (importar y exportar de un sistema), también se usa mucho para la traducción de datos lineales y superficiales en tres dimensiones. Existen algunas variaciones de IGES; la versión más nueva es la 5.3 publicada en 1996.

Otro formato útil es un estándar basado en el modelo sólido, llamado **Especificación de Intercambio de Datos del Producto** (PDES, por sus siglas en inglés), que se basa en el Estándar para el Intercambio de datos del modelo del Producto (STEP, por sus siglas en inglés) desarrollado por la International Standards Organization. La PDES permite que entre sistemas CAD se transfiera información acerca de la forma, diseño, manufactura, aseguramiento de la calidad, pruebas, mantenimiento, etc. La creciente popularidad de PDES y STEP ha llevado al uso menos frecuente de la IGES.

38.4.2 Elementos de los sistemas CAD

El proceso de diseño empleando un sistema CAD consta de cuatro etapas: modelación geométrica, análisis y optimización del diseño, revisión y evaluación del diseño y base de datos.

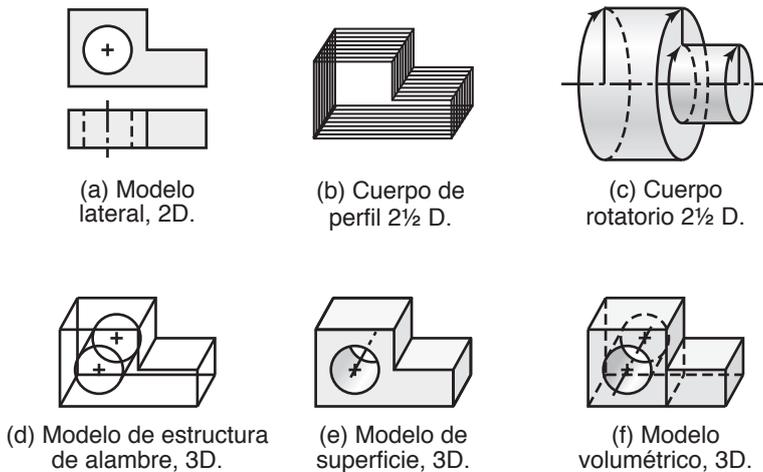


FIGURA 38.2 Varios tipos de modelación para CAD.

Modelación geométrica. En la *modelación geométrica* se describe matemáticamente un objeto físico o cualquiera de sus partes. El diseñador construye primero un modelo geométrico por medio de comandos que crean o modifican líneas, superficies, sólidos, dimensiones y texto. Juntos, estos elementos ofrecen una representación exacta y completa del objeto en dos o tres dimensiones. Los resultados se muestran y se pueden mover por la pantalla, además de que es posible magnificar cualquier sección para ver los detalles.

Los modelos desarrollados en un sistema CAD se pueden presentar de tres maneras (figura 38.2):

1. En la **representación en línea**, también llamada **representación de estructura de alambre**, todos los *bordes* del modelo se ven como líneas sólidas. Sin embargo, esta imagen puede ser ambigua o difícil de visualizar, en particular para formas complejas.

Los tres tipos de representaciones de estructuras de alambre son de *dos*, *dos y media* y *tres dimensiones*. Una imagen bidimensional muestra el perfil del objeto y una en dos dimensiones y media se obtiene por medio de un *barrido traslacional* (al mover el objeto bidimensional a lo largo del eje z). Para objetos redondos se puede generar un modelo en dos dimensiones y media con sólo *rotar* un modelo bidimensional alrededor de sus ejes.

2. En el **modelo de superficie** se muestran todas las *superficies* visibles; estos modelos definen las características superficiales y las aristas de los objetos. En el presente, los programas CAD usan curvas *Bezier*, interpolaciones B, o interpolaciones B racionales no uniformes (NURBS, por sus siglas en inglés) para el modelado de superficies. Cada uno de estos métodos utiliza puntos de control para definir una curva o superficie polinomial. Una curva Bezier pasa a través del primero y último vértices y usa los otros puntos de control para generar una curva mezclada. La desventaja de las curvas Bezier es que cualquier modificación de un punto de control afectará toda la curva.

Las interpolaciones B son curvas polinomiales construidas por partes, en las que la modificación de un punto de control afecta a la curva sólo en el área de la modificación. La figura 38.3 muestra ejemplos de curvas Bezier bidimensionales e interpolaciones B. Una NURBS es un tipo especial de interpolación B tal que cada punto de control tiene un peso asociado con ella.

3. En el **modelo sólido** se muestran todas las superficies, pero los datos describen el volumen interior. Los modelos sólidos se construyen a partir de (a) *modelos de barrido* (figura 38.2c y e) o con las técnicas que se muestran en la figura 38.4; (b) *representación de contorno* (frontera) (B-rep), donde las superficies se combinan para desarrollar un modelo sólido (figura 38.4a), y (c) *geometría sólida constructiva* (CSG, por sus siglas en inglés), donde se combinan formas simples como esferas, cubos, bloques, cilindros y conos (llamadas *formas primitivas de sólidos*), para desarrollar un modelo sólido (figura 38.4b).

Los programas computacionales permiten al usuario seleccionar cualquier combinación de estas formas primitivas y sus tamaños y combinarlas en el modelo sólido que se desee. Aunque los modelos sólidos tienen ventajas como la facilidad para hacer el análisis del diseño, y para manufacturar la parte, requieren más memoria de cómputo y tiempo de procesamiento que los modelos de estructura de alambre y de superficies como los que se ilustran en la figura 38.2.

El estándar de la maquinaria para hacer prototipos rápidos, el **formato de archivos STL** (abreviatura de *estereolitografía* pero también llamado *Lenguaje Estándar de Re-*

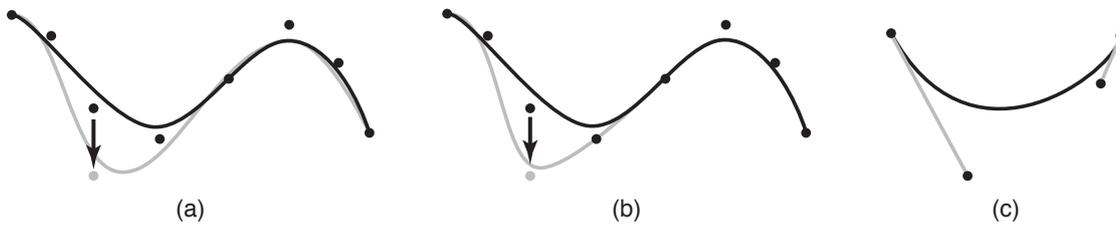


FIGURA 38.3 Tipos de interpolaciones. (a) Curva Bezier que pasa a través de los puntos de control primero y último, pero genera una curva a partir de los otros puntos; al cambiar un punto de control se modifica toda la curva. (b) Una interpolación B se construye por partes, de modo que el cambio de un vértice afecta la curva sólo en la vecindad del punto de control cambiado. (c) Una curva Bezier de tercer orden (cúbica) se construye a través de dos puntos de control adyacentes, con otros dos puntos de control que definen la pendiente de la curva en los extremos. Una curva Bezier de tercer orden por partes es continua, pero su pendiente puede ser discontinua.

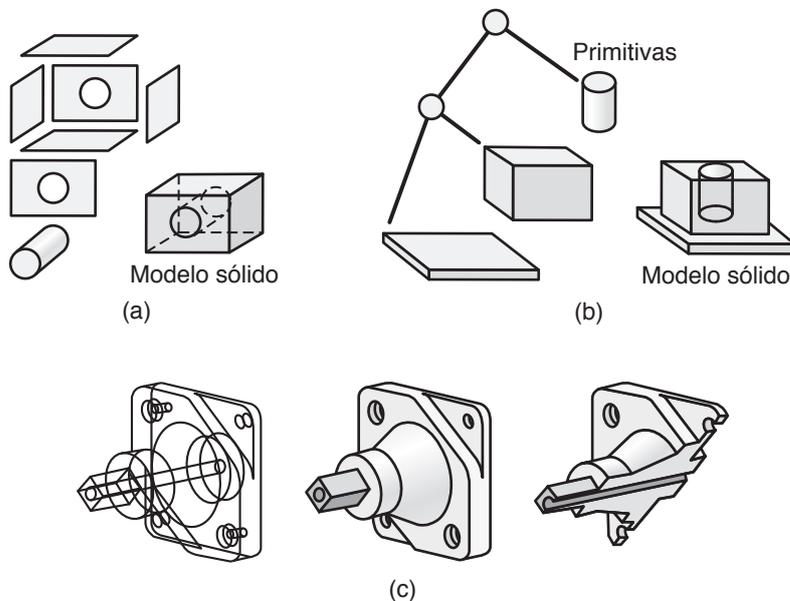


FIGURA 38.4 (a) Representación de contorno de sólidos que muestra las superficies que encierran al modelo sólido y el modelo sólido generado. (b) Modelo sólido representado como composiciones de formas primitivas sólidas. (c) Tres representaciones de la misma parte por medio de CAD. Fuente: Basado en P. Ranky.

cubrimientos), permite hacer descripciones de partes tridimensionales. Básicamente, un archivo STL consiste en cierto número de triángulos que definen la superficie exterior (figura 38.5). Con un número suficientemente grande de triángulos se puede definir la superficie dentro de la tolerancia prescrita, aunque requiere un archivo de tamaño grande. Con la manufactura aditiva es posible obtener la sección transversal a cualquier altura y el polígono resultante se usa después para planear la parte (vea la figura 20.3). El uso del formato STL en los prototipos rápidos, junto con su fácil implementación, ha llevado al empleo de este formato también en otras aplicaciones, como en la elaboración de gráficas por computadora y la transferencia de datos CAD en general.

Una clase especial de modelo sólido es un **modelo paramétrico**, donde una parte se almacena no sólo en términos de una B-rep o definición CSG, sino que se obtiene a partir de las dimensiones y restricciones que definen las características (figura 38.6). Siempre

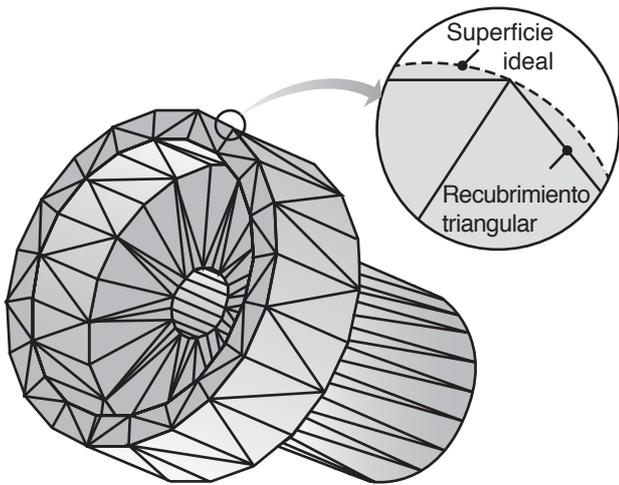


FIGURA 38.5 Ejemplo de una descripción STL de una parte. Note que la superficie está definida por un recubrimiento de triángulos y que hay un error inherente de forma que ocurre con las superficies curvadas; sin embargo, esto puede ser llevado a cualquier tolerancia que se desee con la incorporación de más triángulos en la superficie.

que se hace un cambio, la parte se recrea a partir de estas definiciones, característica que permite hacer actualizaciones y cambios sencillos y directos a los modelos.

En la figura 38.7 se muestra la **representación octree** de un objeto sólido; es análoga pero en tres dimensiones a los píxeles de una pantalla de televisión. Así como cualquier área puede ser descompuesta en cuadrantes, cualquier volumen puede serlo en octantes que después se identifican como sólidos, vacíos o parcialmente llenos. Los *vóxeles* (de las palabras *volumen* y *píxeles*) parcialmente llenos se descomponen en octantes más pequeños y se reclasifican. Al incrementar la resolución es posible tener un detalle excepcional de la parte. Aunque este proceso puede parecer algo complicado, permite hacer la descripción exacta de superficies complejas.

La representación octree se usa particularmente en aplicaciones biomédicas, como la modelación de la geometría de huesos, y también se ha implementado en juegos de computadora en los que se busca el impacto visual de objetos a escalas múltiples. Para aplicaciones más sencillas se utilizan representaciones vóxel a una resolución.

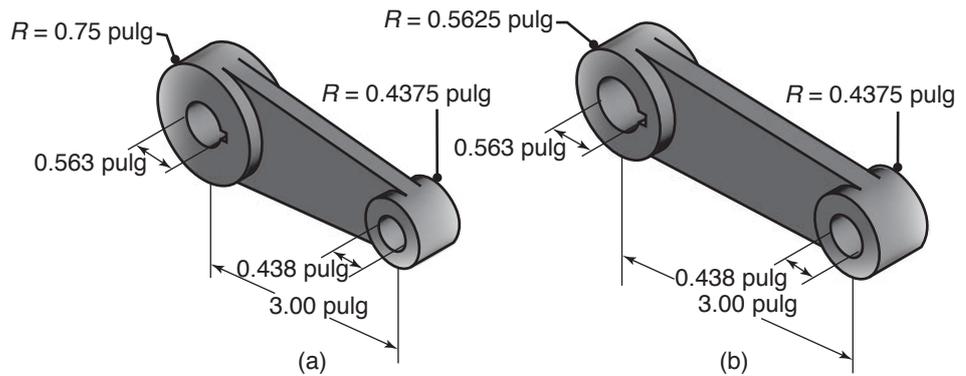


FIGURA 38.6 Ejemplo de diseño paramétrico; las dimensiones de las características de la parte se pueden modificar con facilidad para obtener rápidamente un modelo sólido actualizado.

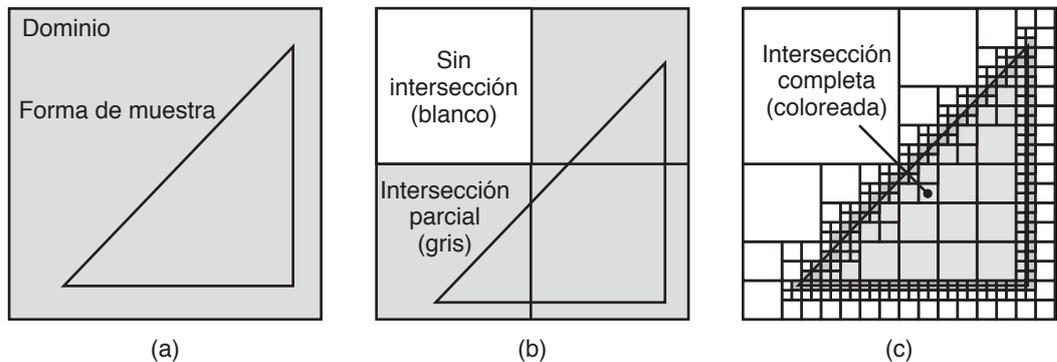


FIGURA 38.7 Representación octree de un objeto sólido; cualquier volumen se puede descomponer en octantes, los que después se identifican como sólido, vacío o parcialmente lleno. Se muestra una versión bidimensional (cuadtree) para la representación de formas en un plano.

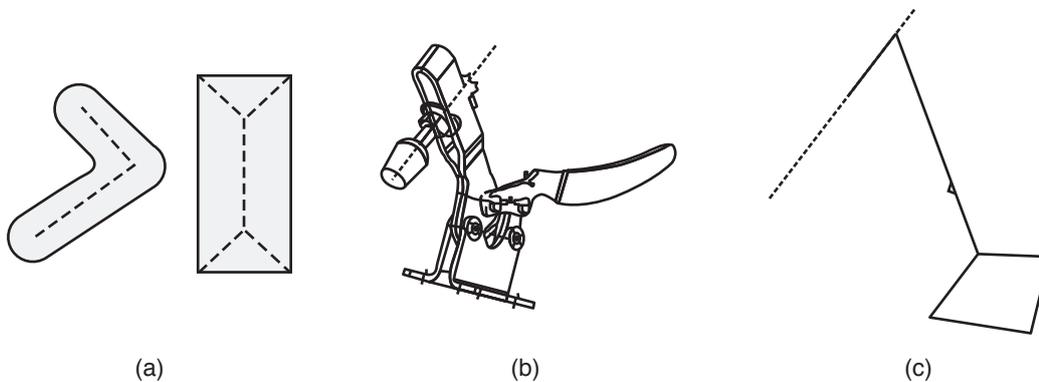


FIGURA 38.8 (a) Ilustración de la estructura de datos en esqueleto para objetos sólidos; el esqueleto es la línea punteada en el interior del objeto; (b) vista general de una abrazadera y (c) modelo de esqueleto. Fuente: S. D. Lockhart y C. M. Johnson, *Engineering Design Communication*, Prentice Hall, 2000.

Un **esqueleto** (figura 38.8) es la familia de líneas, planos y curvas que describen una parte, pero sin el detalle de los modelos de superficie; se usa comúnmente para el análisis cinemático de partes o ensambles. Conceptualmente, un esqueleto se construye por medio del ajuste del círculo más grande (o esfera para objetos tridimensionales) presente dentro de la geometría; el esqueleto es el conjunto de puntos que conectan los centros de los círculos o esferas. Un área que se mantiene en continua investigación involucra el uso de modelos de esqueleto en vez de modelos convencionales de superficie o sólidos, en especial para geometrías complicadas como las de aplicaciones biomédicas.

Análisis y optimización del diseño. Después de que se han determinado las características geométricas de un diseño en particular, se le somete al análisis de ingeniería. Esta fase puede consistir, por ejemplo, en el estudio de esfuerzos, deformaciones, deflexiones, vibraciones, transferencia de calor, distribución de temperaturas o tolerancias dimensionales. Existen varios paquetes computacionales, como programas que se basan en el elemento finito, ABAQUS, ANSYS, NASTRAN, LS-DYNA, MARQ y ALGOR, cada uno de los cuales tiene la capacidad de calcular dichas cantidades con exactitud y rapidez.

Debido a la relativa facilidad con que se ejecutan dichos análisis, los diseñadores buscan cada vez más analizar con mayor profundidad un diseño antes de pasarlo a producción. No obstante, son necesarios experimentos y mediciones en campo para determinar los efectos reales de las cargas, temperaturas y otras variables en los componentes diseñados.

Revisión y evaluación del diseño. Una etapa importante del diseño es su revisión y evaluación con el fin de comprobar cualquier interferencia o exceso entre los distintos componentes. La revisión se lleva a cabo para evitar dificultades en el ensamble o en el uso de la parte y para determinar si los miembros móviles, como las uniones, van a operar en la forma que se espera. Existe software con la capacidad de hacer animaciones para identificar problemas potenciales en los miembros móviles y otras situaciones dinámicas. Durante esta etapa se dimensiona la parte y se precisa la tolerancia en el grado total que se requiere para la manufactura.

Base de datos. Muchos componentes, como los remaches y engranes, aunque sean componentes estándar, se producen en masa de acuerdo con una especificación de diseño dada o son idénticos a partes utilizadas en diseños anteriores. Los sistemas CAD tienen un sistema interno de administración de base de datos que permite que los diseñadores localicen, observen y tomen partes almacenadas en una biblioteca. Estas partes se modelan

en forma paramétrica para permitir la actualización rentable de la geometría de la parte. En el comercio existen algunas bases de datos con grandes bibliotecas de partes; muchos proveedores forman sus propias bibliotecas y están disponibles en internet.

38.5 Manufactura asistida por computadora

La *manufactura asistida por computadora* (CAM, por sus siglas en inglés) comprende el empleo de computadora para ayudar en todas las fases de la manufactura de un producto; agrupa muchas de las tecnologías descritas en el capítulo 37 y en éste. Debido a sus beneficios conjuntos, es frecuente que CAD y CAM se combinen en **sistemas CAD/CAM**. Esta combinación permite la transferencia de información de la etapa de diseño a la de planeación de la manufactura, sin necesidad de volver a capturar manualmente los datos de la geometría de la parte.

La base de datos desarrollada durante el CAD se guarda y después es procesada por CAM para extraer los datos e instrucciones relevantes con propósitos como la operación y el control de la maquinaria de producción, del equipo de manejo de materiales y la prueba e inspección automatizadas de la calidad del producto. Los sistemas CAD/CAM también son capaces de codificar y clasificar partes en grupos de diseño o atributos de manufactura semejantes, como se describe en la sección 38.8.3.

Las aplicaciones comunes de CAD/CAM incluyen:

- Programación del control numérico y de robots industriales.
- Diseño de dados o matrices y moldes de fundición en los que, por ejemplo, se programan previamente las tolerancias de la contracción.
- Datos para operaciones de trabajo de metales, como los moldes complejos empleados para el moldeo de placas y dados progresivos para el estampado.
- Diseño de herramientas y sujetadores, así como electrodos EDM.
- Control e inspección de la calidad, como máquinas para medir coordenadas programadas en una estación de trabajo CAD/CAM.
- Planeación y calendarización del proceso.
- Distribución de la planta.

Una característica importante del CAD/CAM en las operaciones de maquinado, por ejemplo, es la capacidad de calcular y describir la *trayectoria de la herramienta* (vea las figuras 20.3, 24.2, 26.14 y 26.22). Las instrucciones (*programas*) se generan en computadora y el programador las puede modificar con el fin de optimizar la trayectoria seguida por la herramienta. El ingeniero o técnico despliega y comprueba visualmente dicho recorrido en busca de posibles colisiones con abrazaderas, sujetadores u otras interferencias.

Con CAD/CAM ha sido posible reducir de manera significativa los costos de manufactura y mejorar la productividad, gracias a la estandarización del desarrollo del producto y a la disminución del esfuerzo de diseño, pruebas y elaboración de prototipos. Por ejemplo, el avión de pasajeros bimotor Boeing 777 se diseñó completamente por computadora (lo cual se conoce como **diseño sin papel**), con 2000 estaciones de trabajo conectadas a ocho computadoras. El avión se construyó *directamente* a partir del software CAD/CAM en que se desarrolló (una versión mejorada del sistema CATIA) y no se construyeron prototipos ni maquetas, como se requería para los modelos anteriores. El costo de este desarrollo fue de \$6000 millones de dólares estadounidenses.

38.6 Planeación del proceso asistida por computadora

La **planeación del proceso** se refiere básicamente a la selección de los métodos de producción: herramientas, sujeciones, maquinaria, secuencias de operaciones y ensamble; todas estas actividades deben planearse, lo cual tradicionalmente ha sido hecho por los

HOJA DE RUTA		
NOMBRE DEL CLIENTE: Midwest Valve Co.		NOMBRE DE LA PARTE: Valve body
CANTIDAD: 15		PARTE NÚM.: 302
Operación núm.	Descripción de la operación	Equipo
10	Inspeccionar forjado, verificar dureza	Máquina de ensayo de dureza Rockwell
20	Maquinado de desbaste de las bridas	Torno núm. 5
30	Maquinado de acabado para las bridas	Torno núm. 5
40	Mandrinado y contraabocardado de orificio	Taladro horizontal núm. 1
50	Taladrado de ranuras internas	Taladro horizontal núm. 1
60	Taladrar y machuelar orificios	Taladro de columna núm. 2
70	Rectificar caras terminales de las bridas	Esmeril núm. 2
80	Rectificar mandrinado	Esmeril núm. 1
90	Limpiar	Desgrasador por vapor
100	Inspeccionar	Probador ultrasónico

FIGURA 38.9 Ejemplo de una hoja de ruta tradicional y sencilla. Las *hojas de operación* (ruta) incluyen información adicional sobre los materiales, herramientas, tiempo estimado de cada operación, parámetros de procesamiento (como velocidades de corte y avances) y otra información; la hoja de ruta avanza con la parte de una operación a otra. Las hojas de ruta han sido sustituidas en gran medida por bases de datos computarizadas; esta hoja de ruta ilustra el contenido mínimo representativo de una parte sencilla.

planificadores del proceso. En un archivo de computadora se documenta la secuencia de procesos y operaciones que se va a ejecutar, máquinas que se usarán, tiempo estándar de cada operación e información similar. Las **hojas de ruta** (figura 38.9) son los medios tradicionales utilizados para almacenar datos de manufactura y son útiles para mostrar el tipo de datos que se requieren.

La *planeación del proceso asistida por computadora* (CAPP, por sus siglas en inglés) realiza la compleja tarea de planear el proceso por medio de la visualización de la operación total como un sistema *integrado*, de modo que las etapas individuales de procesamiento se coordinan y realizan de manera eficiente y confiable. La CAPP es particularmente eficaz en la producción de partes muy variadas y en pequeños volúmenes. Aunque se requiere una gran cantidad de software y buena coordinación con CAD/CAM y otros aspectos de sistemas de manufactura integrada (descritos en el resto de este capítulo), CAPP es una herramienta poderosa para planear y calendarizar (programar) con eficiencia las operaciones de manufactura.

38.6.1 Elementos de los sistemas CAPP

Hay dos tipos de sistemas de planeación del proceso asistida por computadora.

Sistema variante. También llamado **sistema derivado**, estos archivos de computadora contienen un plan del proceso estándar para la parte que se va a producir. Con base en esta forma y sus características de manufactura, se busca un plan estándar en la base de

datos utilizando un número de código específico de la parte. El plan se localiza en el software, se despliega para revisarlo y se imprime como hoja de ruta.

El *plan de proceso variante* incluye información como los tipos de herramientas y máquinas que se requieren, la secuencia de operaciones a efectuar y las velocidades, avances y tiempo requerido para cada secuencia. También se realizan modificaciones menores a un plan de procesos existente, que por lo general son necesarias. Si el plan estándar para una parte en particular no se encuentra en los archivos de computadora, se localiza otro que tenga un número de código similar y una hoja de ruta elaborada. Si no existe una hoja de ruta para una parte nueva, se hace una y se guarda en la memoria de la computadora.

Sistema generativo. En este sistema se genera automáticamente un plan del proceso con base en los mismos procedimientos lógicos que seguiría un planificador del proceso tradicional al elaborar esa parte en particular. Sin embargo, el *sistema generativo* es complejo porque debe contener información exhaustiva y detallada sobre (a) forma y dimensiones de la parte; (b) capacidades del proceso; (c) selección de los métodos de manufactura, maquinaria y herramientas, y (d) secuencia de operaciones que se han de ejecutar.

El sistema generativo crea un nuevo plan en lugar de usar y modificar otro ya existente, como debe hacer el sistema variante. Aunque por lo general se usa menos que el sistema variante, el sistema generativo tiene ventajas como (a) flexibilidad y consistencia en la planeación del proceso para partes nuevas y (b) mayor calidad conjunta de la planeación, debido a la capacidad de la lógica de las decisiones del sistema para optimizar la planeación y utilizar tecnología de manufactura actualizada.

Las capacidades de las computadoras para la planeación del proceso también se pueden integrar en los sistemas de planeación y control de la producción. Estas actividades son un subsistema de la manufactura integrada por computadora, como se describe en la sección 38.3. Es posible realizar varias funciones, como la **planeación de la capacidad** de las plantas para satisfacer la calendarización de la producción, el control de inventarios y las compras.

38.6.2 Planeación de los requerimientos de material y de los recursos de manufactura

Los sistemas basados en computadora para administrar inventarios y la calendarización de la entrega de materias primas y herramientas se llaman sistemas de *planeación de requerimientos de material* (MRP, por sus siglas en inglés). El MRP también se considera un **método de control de inventarios** e involucra mantener registros completos de los inventarios de materiales, suministros, partes en varias etapas de producción (lo que se denomina *trabajo en proceso* o WIP, por sus siglas en inglés), órdenes, compras y calendarización. Por lo general hay varios archivos de datos involucrados en una calendarización maestra de producción. Estos archivos se refieren a las materias primas requeridas (mencionadas en una **lista de materiales**), los niveles de la estructura del producto (artículos individuales que componen un producto, como componentes, subensambles y ensambles) y la calendarización.

La *planeación de recursos de manufactura* (MRP-II) controla todos los aspectos de la planeación de la manufactura por medio de retroalimentación. Aunque el sistema es complejo, es capaz de hacer la calendarización o programación final de la producción, monitorear los resultados reales en términos del desempeño y la producción y comparar los resultados contra la calendarización (programación) de producción maestra.

38.6.3 Planeación de los recursos de la empresa

La *planeación de los recursos de la empresa* (ERP, por sus siglas en inglés) es básicamente una extensión del MRP-II. Aunque hay diversas variantes, también es un método para planear y controlar con eficacia todos los recursos necesarios en una organización de negocios en cuanto a tomar pedidos de productos, fabricarlos, enviarlos al cliente y darles servicio. Así, la ERP busca coordinar, optimizar e integrar en forma dinámica todas las

fuentes de información y las muy diversas actividades técnicas y financieras de una organización de manufactura.

La implementación eficaz de la planeación de los recursos de la empresa es una tarea difícil debido a:

- Las dificultades encontradas en la comunicación oportuna, eficaz y confiable entre todas las partes involucradas, en especial en una empresa de negocios global.
- La necesidad de cambiar y evolucionar las prácticas de negocios, en una época en la que los sistemas de información y el **comercio electrónico** (definido como la compra y venta de productos o servicios por medio de sistemas electrónicos) se han vuelto muy relevantes e importantes para el éxito de las organizaciones de negocios.
- La necesidad de satisfacer requerimientos extensos y específicos de hardware y software para ERP. La ERP-II es un desarrollo más reciente que usa herramientas basadas en web para ejecutar las tareas de ERP. Estos sistemas están abocados a extender las capacidades de la planeación de los recursos de la empresa más allá de la organización que los aloja para permitir la interacción y coordinación a través de entidades corporativas.

38.7 Simulación en computadora de los procesos y sistemas de manufactura

Con la creciente sofisticación del hardware y software de computadora, la *simulación en computadora de los procesos y sistemas de manufactura* ha avanzado con rapidez. La simulación adopta dos formas básicas:

1. Es un modelo de operación específica que busca determinar la viabilidad de un proceso u optimizar y mejorar su desempeño.
2. Modela procesos múltiples y sus interacciones para ayudar a los planificadores del proceso y diseñadores de la planta en la distribución de la maquinaria y las instalaciones.

Los procesos individuales pueden modelarse utilizando varios esquemas matemáticos. Los problemas comunes que se abordan son (a) la **viabilidad del proceso**, como la facilidad de moldeo de una placa metálica en cierto troquel, y (b) la **optimización del proceso**, como el flujo del material en la forja en un determinado dado o matriz para identificar defectos potenciales, o el diseño del molde en la fundición para eliminar los puntos calientes, facilitar el enfriamiento uniforme y minimizar los defectos. En los paquetes de software, existentes en el comercio y que no son caros, se aplica cada vez más el análisis del elemento finito (lo que se llama **simulación del proceso**).

La simulación de todo el sistema de manufactura, que involucre procesos y equipos múltiples, ayuda a los ingenieros de la planta a organizar la maquinaria e identificar los elementos críticos de ésta. Dichos modelos también ayudan a los ingenieros de manufactura a calendarizar y trazar las rutas por medio de la *simulación de eventos discretos*. Existen en el comercio paquetes de software que se usan con frecuencia para dichos propósitos, aunque también es posible desarrollar programas de software (paquetes computacionales) especiales escritos para una compañía en particular.

EJEMPLO 38.1 Simulación de la manufactura a escala de la planta

Varios ejemplos y estudios de caso presentados en este libro se han centrado en la simulación de procesos y operaciones de manufactura individuales. La disponibilidad de sistemas de cómputo de bajo costo y alto rendimiento, así como el desarrollo de software avanzado han permitido realizar la simulación de sistemas de ma-

nufactura *completos*, lo que ha llevado a la optimización de las operaciones de manufactura y ensamble.

Por ejemplo, el software *Digital Manufacturing Hub* (Delmia Corporation) permite la simulación de procesos de manufactura en tres dimensiones, como son (a) el uso de maniqués de humanos para identi-

ficar riesgos de seguridad, problemas de manufactura o cuellos de botella; (b) mejorar la exactitud del maquinado o (c) optimizar la organización de las herramientas (vea la figura 38.10a). Como la simulación se lleva a cabo antes de la construcción de una línea de ensamble, reduce en forma significativa los tiempos y costos de desarrollo.

La figura 38.10b ilustra la simulación de una línea de soldadura robotizada en una planta automotriz, donde se simulan los movimientos de un robot y se detectan en un ambiente virtual las colisiones con robots vecinos u otras máquinas. El programa se puede modificar para impedir dichas colisiones antes de que la línea de ensamble entre realmente en operación. Si bien este ejemplo es una demostración poderosa de la utilidad de la simulación de sistemas, una aplicación más común es optimizar la secuencia de operaciones y organización de la maquinaria con el fin de reducir los costos de manufactura.

El software también tiene la capacidad de realizar análisis ergonómicos de varias operaciones y esquemas de la maquinaria y, por tanto, identificar los cuellos de botella en el movimiento de las partes, el equipo o personal. De ese modo, los cuellos de botella pueden ser

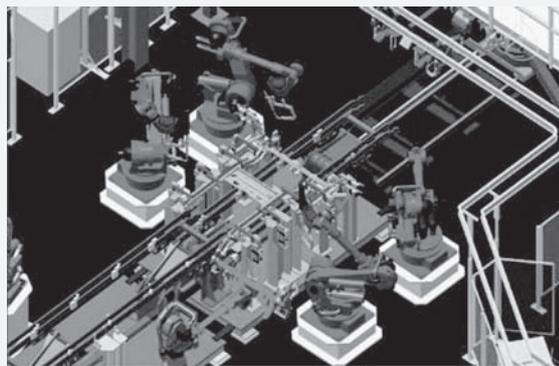
eliminados por el planificador del proceso al ajustar los procedimientos automatizados o manuales en dichas ubicaciones. Con el uso de esas técnicas, una planta de Daimler-Chrysler ubicada en Rastatt, Alemania, pudo balancear sus líneas de producción de modo que cada trabajador es productivo en promedio 85 a 95% del tiempo.

Otra aplicación de la simulación de sistemas es la planeación de las operaciones de manufactura para optimizar la *producción y efectuarla justo a tiempo* (sección 39.5). Por ejemplo, si un fabricante de automóviles necesita producir 1000 vehículos en un tiempo dado, la producción se puede optimizar con el uso de ciertas estrategias, como la distribución del número de vehículos por color de manera que se minimice el número de cambios de pintura en las cabinas de pintado.

Con respecto a la producción justo a tiempo, software como el producido por ILOG Corporation ayuda a planear y calendarizar (programar) las operaciones de la planta con suficiente anticipación como para que se puedan ordenar los materiales a medida que se necesitan, eliminando así la costosa acumulación de inventarios.



(a)



(b)

FIGURA 38.10 Simulación de las operaciones a escala de la planta. (a) Uso de maniqués virtuales para evaluar los movimientos requeridos y la eficiencia del ensamblado manual de un tablero automotriz. (b) Línea de soldadura robotizada, en la que las interacciones de múltiples robots y piezas de trabajo se simula para detectar y evitar colisiones y mejorar la productividad. Fuente: Cortesía de Dassault Systemes. Impreso con permiso.

38.8 Tecnología de grupos

La *tecnología de grupos* (GT, por sus siglas en inglés) es una metodología que busca aprovechar las **similitudes del diseño y procesamiento** entre las partes a producir. Como se ilustra en la figura 38.11, estas características sugieren claramente que se obtienen grandes beneficios al **clasificar y codificar** las partes en *familias*. Una compañía descubrió que al desensamblar cada producto en sus componentes individuales y luego identificar

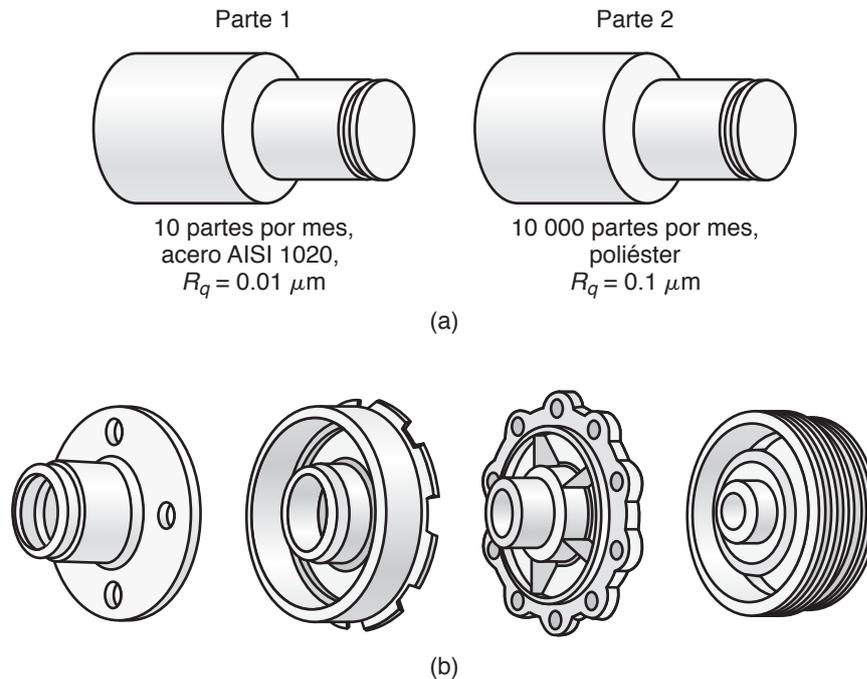


FIGURA 38.11 Partes agrupadas de acuerdo con sus (a) similitudes geométricas y (b) atributos de manufactura.

las partes que eran semejantes, 90% de 3000 piezas podían constituir sólo cinco familias principales de partes.

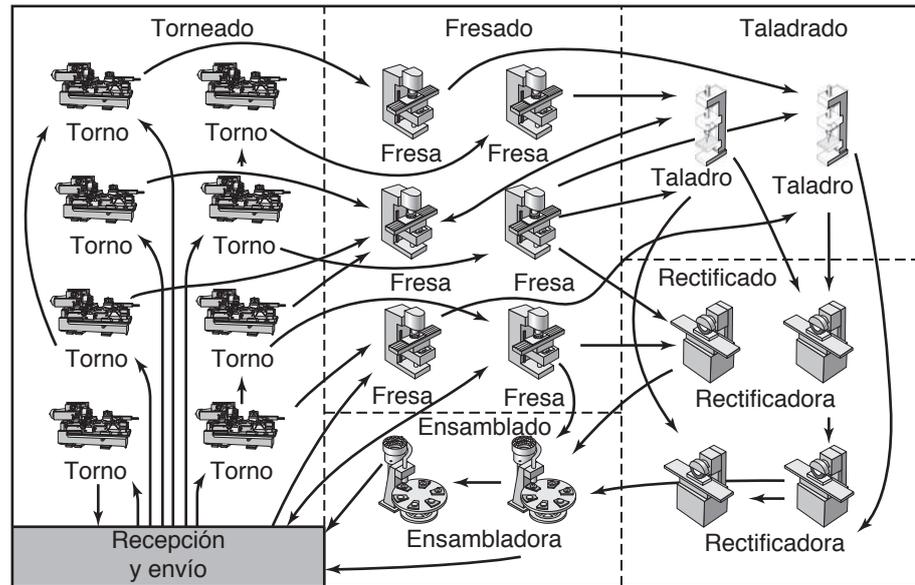
Por ejemplo, una bomba mecánica se puede descomponer en sus componentes básicos como motor, carcasa, ejes, aspás y sellos. Se observará que cada uno de estos componentes de la bomba es básicamente el mismo en términos de sus características de diseño y manufactura; en consecuencia, es posible colocar todos los ejes en una familia de ejes o de sellos, y así sucesivamente. La tecnología de grupos se vuelve atractiva en especial debido a la siempre creciente variedad de productos, que con frecuencia se producen por lotes. Como casi 75% de la manufactura actual es producción por lotes, la mejora en la eficiencia adquiere una importancia especial.

Distribución de la planta. En la figura 38.12a se muestra el flujo tradicional del producto en la manufactura por lotes, llamado **distribución de planta funcional**. Observe que las máquinas del mismo tipo se acomodan por grupos, es decir grupos de tornos, de fresadoras, de taladros y de esmeriles. Se observará que en dicha distribución hay un considerable movimiento aleatorio, como lo muestran las flechas que indican el movimiento de materiales y partes. Debido a que se desperdicia tiempo y esfuerzo, resulta obvio que dicho arreglo no es eficiente. Una mejor línea de flujo de productos que aprovecharía la tecnología de grupos es la **distribución de planta por grupos**, que se presenta en la figura 38.12b (vea también *manufactura celular* en la sección 39.2). Observe la mayor simplicidad y la disminución del número de trayectorias y movimientos entre las máquinas.

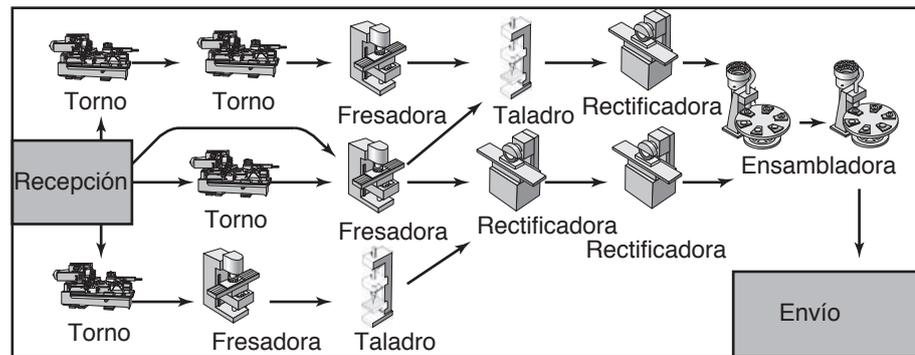
38.8.1 Ventajas de la tecnología de grupos

Las principales ventajas de la tecnología de grupos son:

- Hace posible la estandarización de los diseños de la parte y la minimización de la duplicidad de diseños. Los nuevos diseños de partes se desarrollan en otros similares usados previamente, lo que ahorra una cantidad significativa de tiempo y esfuerzo. Además, el diseñador del producto tiene la posibilidad de determinar



(a)



(b)

FIGURA 38.12 (a) Distribución funcional de las máquinas herramienta en una planta tradicional; las flechas indican el flujo de materiales y partes en varias etapas de procesamiento. (b) Distribución con tecnología de grupos (celular). Fuente: Basado en M. P. Groover.

rápidamente si ya existen datos de una parte similar en los archivos de cómputo de la compañía.

- Los datos que reflejan la experiencia del diseñador y el planificador del proceso de manufactura se almacenan en la base de datos; de esta manera, un ingeniero nuevo y menos experimentado se beneficia pronto de la experiencia de ellos al recuperar los anteriores diseños y planes del proceso.
- Es más fácil estimar los costos de manufactura y también obtener las estadísticas relevantes de materiales, procesos, número de partes producidas y otros factores.
- Los planes del proceso se estandarizan y calendarizan con mayor eficiencia, los pedidos se agrupan para tener una producción más eficaz, lo que mejora la utilización de las máquinas. Los tiempos de preparación se reducen y las partes se producen con más eficiencia y con mejor y más consistente calidad del producto. En la pro-

ducción de una familia de partes se comparten herramientas, elementos de sujeción y maquinaria semejantes.

- Con la implementación de CAD/CAM, la manufactura celular y la metodología CIM, la tecnología de grupos es capaz de mejorar en gran manera la productividad y de reducir los costos con la producción por lotes que aprovecha los beneficios de la producción en masa. En función del nivel de implementación, los ahorros en cada una de las distintas fases de diseño y manufactura están en el rango de 5 a 75 por ciento.

38.8.2 Clasificación y codificación de las partes

En la tecnología de grupos, las partes se identifican y agrupan en familias por medio de **sistemas de clasificación y codificación (C/C)**. Este proceso es una primera etapa, crítica y compleja, y se lleva a cabo de acuerdo con los atributos de diseño y manufactura de la parte (vea la figura 38.14).

Atributos de diseño. Estos atributos corresponden a las similitudes entre las características geométricas y consisten en:

- Formas y dimensiones externas e internas.
- Razones de aspecto, como las de largo a ancho o longitud a diámetro.
- Tolerancias dimensionales.
- Acabado superficial.
- Funciones de la parte.

Atributos de manufactura. La tecnología de grupos usa las similitudes o semejanzas en los métodos y secuencias de las operaciones de manufactura efectuadas en la parte. Debido a que la selección de un proceso o procesos de manufactura depende de numerosos factores, los atributos de diseño y manufactura están interrelacionados. Los atributos de manufactura de una parte consisten en:

- Procesos primarios.
- Procesos secundarios y de acabado.
- Tolerancias dimensionales y acabado superficial.
- Secuencia de las operaciones realizadas.
- Herramientas, dados o matrices, elementos de sujeción y maquinaria.
- Cantidad y tasa de producción.

La codificación puede ser lenta y requerir una experiencia considerable. Se puede hacer en forma genérica con sólo ver las formas de las partes para después clasificarlas como corresponde; por ejemplo, partes que tienen simetría rotacional, partes con forma rectilínea y partes que tienen razones grandes de superficie a espesor. Un enfoque más global es revisar todos los datos y planos relacionados con el diseño y la manufactura de todas las partes.

Las partes también se clasifican con el estudio de su flujo de producción durante el ciclo de manufactura, enfoque llamado **análisis del flujo de producción (PFA)**, por sus siglas en inglés). De la sección 38.6, recuerde que las hojas de ruta muestran con claridad los planes del proceso y la secuencia de operaciones que se han de efectuar. Sin embargo, una desventaja del PFA es que una hoja de ruta particular no necesariamente indica que se haya optimizado el total de la operación de manufactura.

38.8.3 Codificación

La codificación de partes se basa en el sistema de codificación propio de la compañía o en alguno de varios sistemas de clasificación y codificación disponibles en el software comercial; con frecuencia, el código está incorporado en los paquetes de CAD/CAM.

Ya sea que se haya desarrollado en la empresa o se haya comprado, el sistema de codificación debe ser compatible con los demás sistemas de la organización, como la maquinaria de control numérico y los sistemas de planeación del proceso asistida por computadora.

La estructura del código empleada para identificar las familias de partes por lo general consiste en números, letras o en una combinación de ambos. A cada componente específico de un producto se asigna un código. Éste puede referirse sólo a atributos de diseño (por lo general menos de 12 dígitos) o sólo a los de manufactura; la mayor parte de los sistemas avanzados incluyen ambos y usan hasta 30 dígitos. La codificación puede hacerse sin que el usuario la introduzca al software y mostrarse sólo si se solicita la información. Comúnmente, la recuperación de datos de diseño o manufactura se basa en búsquedas con palabras clave.

Los tres niveles básicos de codificación varían en grado de complejidad:

1. **Codificación jerárquica.** También llamada **monocódigo**, la codificación jerárquica interpreta cada dígito sucesivo con base en el valor del dígito precedente. Cada símbolo amplifica la información contenida en el dígito anterior; por tanto, no puede interpretarse un dígito aislado del código. La ventaja de este método es que un código corto contiene una gran cantidad de información; sin embargo, el método es difícil de aplicar en un sistema computarizado.
2. **Policódigos.** En este método, también conocido como codificación **tipo cadena**, cada dígito tiene su propia interpretación, la cual no depende del dígito precedente. Esta estructura tiende a ser relativamente larga, pero permite la identificación de

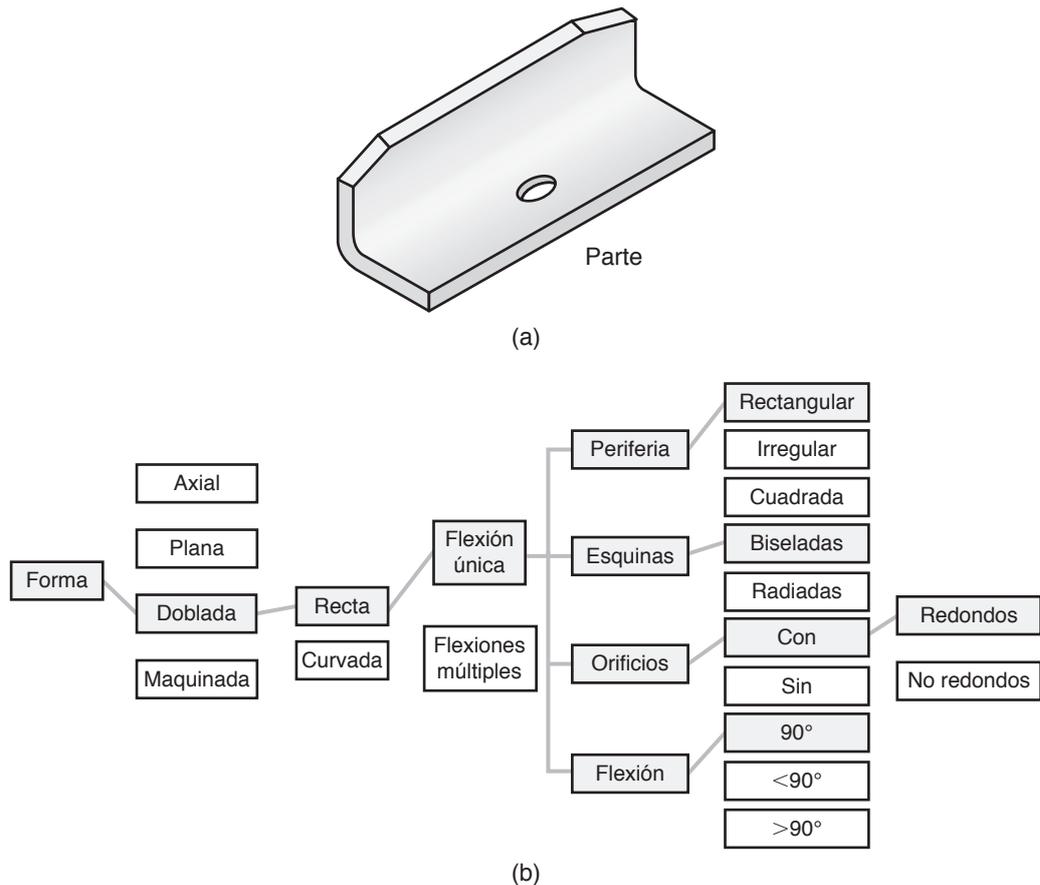


FIGURA 38.13 Clasificación tipo árbol de decisiones para un sostén de placa metálica. Fuente: Basado en G. W. Millar.

atributos específicos de la parte y es muy apropiada para su implementación en computadora.

3. **Codificación de árbol de decisiones.** Este tipo de codificación, también llamada codificación híbrida, es la más avanzada y combina atributos tanto de diseño como de manufactura (figura 38.13).

38.8.4 Sistemas de codificación

Los tres principales sistemas de codificación industrial son:

1. El sistema **Opitz** (en honor de H. Opitz, 1905-1977) fue el primer sistema de codificación exhaustiva que se desarrolló. Consiste básicamente en nueve dígitos (12345 6789) que representan datos de diseño y manufactura (figura 38.14); se usan cuatro

		Código de forma					Código adicional			
		Primer dígito Clase de la parte	Segundo dígito Forma principal	Tercer dígito Maquinado rotacional de la superficie	Cuarto dígito Maquinado de superficie plana	Quinto dígito Orificios auxiliares, dientes de los engranes y formado	Dígito			
							1	2	3	4
0	Partes rotacionales	$\frac{L}{D} < 0.5$	Forma externa, elementos de la forma externa	Forma interna, elementos de la forma interna	Maquinado de superficie plana	Orificios auxiliares	Dimensión	Material	Forma original de la materia prima	Precisión
1		$0.5 < \frac{L}{D} < 3$								
2		$\frac{L}{D} > 3$								
3		$\frac{L}{D} < 2$ con desviación	Forma principal	Rotational machining, internal and external shape elements	Orificios auxiliares, dientes de engrane y formado					
4		$\frac{L}{D} \leq 2$ con desviación								
5	Especial									
6	Partes no rotacionales	$\frac{A}{B} < 3, \frac{A}{C} > 4$ Partes planas	Forma principal	Perforaciones principales	Maquinado de superficie plana	Orificios auxiliares, dientes de engrane y formado				
7		$\frac{A}{B} > 3$ Partes largas	Forma principal							
8		$\frac{A}{B} < 3, \frac{A}{C} > 4$ Partes cúbicas	Forma principal							
9		Especial								

FIGURA 38.14 Sistema de clasificación y codificación según Opitz, el cual consiste en un código para la forma, con cinco dígitos, y un código adicional de cuatro dígitos.

códigos adicionales (1234) para identificar el tipo y la secuencia de las operaciones de producción que se van a ejecutar. El sistema Opitz tiene dos desventajas: (a) es posible tener códigos diferentes para partes que tienen atributos de manufactura semejantes y (b) un número de partes con diferentes formas pueden tener el mismo código.

2. El sistema **multiClase** fue desarrollado para ayudar a automatizar y estandarizar varias funciones de diseño, producción y administración; involucra hasta 30 dígitos (figura 38.15). Este sistema se usa en forma interactiva con una computadora que hace cierto número de preguntas al usuario; con base en las respuestas dadas, la computadora asigna a la parte un número de código de manera automática.
3. El sistema **KK-3** es de propósito general para partes que serán maquinadas o procesadas; este código usa un sistema decimal de 21 dígitos. El código es mucho más largo que los dos anteriores descritos, pero clasifica dimensiones y razones dimensionales, como la razón longitud a diámetro de la parte. En la figura 38.16 se muestra la estructura de un sistema KK-3 para componentes rotacionales.

Análisis del flujo de la producción. Uno de los beneficios principales de la tecnología de grupos es el diseño de células de manufactura (sección 39.2). Considere la situación que se ilustra en la figura 38.17, que busca mostrar una lista simplificada de partes que se van a producir así como la maquinaria requerida. Como puede verse en esta figura, los tipos de máquinas y variedad de partes no conducen por sí mismas al agrupamiento de las máquinas. Con el empleo de tecnología de grupos, las partes se pueden clasificar y codificar, después se organizan en agrupamientos lógicos. Este método, combinado con los requerimientos de producción, permite diseñar células de manufactura para obtener los beneficios asociados con la flexibilidad y utilidad.

Por ejemplo, la figura 38.17 es una hoja de cálculo que muestra un conjunto de partes producidas por un fabricante de bombas mecánicas; también se indican las máquinas

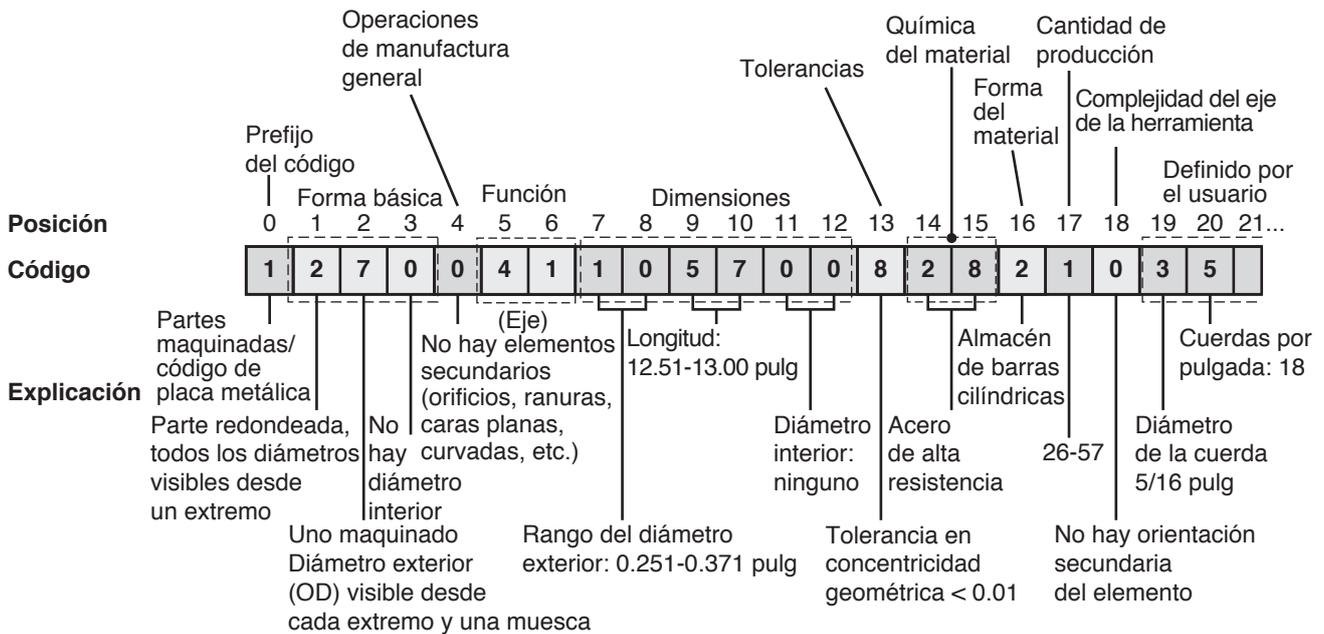


FIGURA 38.15 Clásico código multiClase para una parte maquinada.

Dígito	Artículos	(Componente rotacional)	
1	Nombre de la parte	Clasificación general	
2		Clasificación detallada	
3	Materiales	Clasificación general	
4		Clasificación detallada	
5	Dimensiones principales	Longitud	
6		Diámetro	
7	Formas principales y razón de las dimensiones principales		
8	Detalles de la forma y clases de procesos	Superficie externa	Superficie externa y forma primaria exterior
9			Partes concéntricas con cuerda de tornillo
10			Ranuras funcionales de partes
11			Partes con forma extraordinaria
12		Moldeado/Formado	
13		Superficie cilíndrica	
14		Superficie interna	Forma primaria interna
15			Superficie curvada interna
16			Superficie plana y cilíndrica interna
17		Superficie final	
18	Orificios no concéntricos	Orificios colocados regularmente	
19		Orificios especiales	
20	Procesos sin corte		
21	Precisión		

FIGURA 38.16 Estructura de un sistema KK-3 para componentes rotacionales. Fuente: Cortesía de Japan Society for the Promotion of Machine Industry.

Parte	Brochadora	Torno CNC	Centro de maquinado horizontal	Fresa generadora o generatriz	Torno manual	Torno horizontal	Máquina de tornillos
Rodamiento de cubierta		X					
Engrane de piñón, 56 dientes, 8 pasos	X	X		X			
Acoplamiento de eje							X
Impulsor	X	X					
Perno de 6 pulg					X		
Engrane de impulso, 26 dientes, 8 pasos	X	X		X			
Buje							X
Carcasa del cuerpo			X			X	
Válvula de alivio			X				
Espaciador de baleros							X
Tomas varias			X		X	X	
Barra del yugo							X
Asiento del resorte							X
Yugo		X		X			
Cabezal de la bomba					X	X	

Parte	Torno manual	Torno horizontal	Centro de maquinado horizontal	Brochadora	Torno CNC	Fresa generadora o generatriz	Máquina de tornillos
Perno de 6 pulg	X						
Cabezal de la bomba	X	X					Célula de torneado/fresado
Tomas varias	X	X	X				
Carcasa del cuerpo		X	X				
Válvula de alivio			X				
Impulsor				X	X		
Yugo					X	X	
Rodamiento de cubierta					X		
Engrane de piñón, 56 dientes, 8 pasos				X	X	X	
Engrane de impulso, 26 dientes, 8 pasos				X	X	X	
Espaciador de baleros							X
Acoplamiento de eje							X
Buje							X
Barra del yugo							X
Asiento del resorte							X

FIGURA 38.17 Uso de la tecnología de grupos en la organización de células de manufactura. (a) Hoja de cálculo original de las partes; no es evidente ninguna organización lógica. (b) Después de agrupar las partes con base en sus atributos de manufactura, son discernibles agrupamientos lógicos de la maquinaria.

requeridas para producir las partes. En esta hoja de cálculo no es evidente ningún agrupamiento intuitivo de máquinas. Con una reorganización de los datos, las partes sugieren grupos lógicos para las máquinas, como se muestra en la figura 38.17b. Se debe considerar que estas cifras están muy simplificadas con el fin de mostrar el significado de la tecnología de grupos en la organización de células; por lo general hay muchas más partes y procesos (inclusive metrología) que se deben tomar en cuenta.

RESUMEN

- Los sistemas de manufactura integrada se pueden implementar en diferentes grados con el fin de optimizar las operaciones, mejorar la calidad del producto y reducir los costos de producción.
- Las operaciones de manufactura integrada por computadora se han convertido en los medios más importantes para mejorar la productividad, en respuesta a los rápidos cambios de las demandas del mercado, así como para mejorar el control de las funciones tanto de manufactura como de administración de una organización.
- Ahora hay software avanzado y computadoras poderosas que permiten la descripción de la geometría de la parte en varios formatos diferentes, inclusive con estructura de alambre, octree, modelos de superficie, modelos sólidos, esqueletos y representaciones de contornos (frontera).
- También se usan computadoras para simular operaciones y sistemas de manufactura y para ayudar en la selección de procesos de manufactura.
- La tecnología de grupos es un método poderoso que permite la recuperación rápida de experiencias anteriores de diseño y manufactura al codificar una parte con base en sus características geométricas o atributos de manufactura. Existen varios sistemas de codificación con tecnología de grupos.

TÉRMINOS CLAVE

Análisis del flujo de la producción	Distribución de planta por grupos	Manufactura integrada por computadora	Planeación del proceso
Atributos de diseño	Especificaciones de intercambio	Modelación	Planeación del proceso asistida por computadora
Atributos de manufactura	Estructura de alambre	Modelo de superficie	Representación octree
Base de datos	Función de ejecución del negocio	Modelo sólido	Simulación en computadora
Codificación	Función de planeación del negocio	Planeación de recursos de la empresa	Sistema de adquisición de datos
Diseño e ingeniería asistidos por computadora	Hoja de ruta	Planeación de recursos de manufactura	Sistemas de clasificación y codificación
Diseño sin papel	Manufactura asistida por computadora	Planeación de requerimientos de material	Tecnología de grupos
Distribución de planta funcional			

BIBLIOGRAFÍA

- Amirouche, F. M. L., *Principles of Computer-Aided Design and Manufacturing*, 2a. ed., Prentice Hall, 2004.
- Chang, T. C., Wysk, R. A., Wang, H. P. y Rembold, U., *Computer-Aided Manufacturing*, 3a. ed., Prentice Hall, 2007.
- Chryssolouris, G., *Manufacturing Systems: Theory and Practice*, Springer, 2006.
- Curry, G. L. y Feldman, R. M., *Manufacturing Systems Modeling and Analysis*, Springer, 2008.
- Groover, M., *Automation, Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing*, 3a. ed., Prentice Hall, 2007.
- Parsaei, H., Leep, H. y Jeon, G., *The Principles of Group Technology and Cellular Manufacturing Systems*, Wiley, 2006.
- Rehg, J. A. y Kraebber, H. W., *Computer-Integrated Manufacturing*, 3a. ed., Prentice Hall, 2004.
- Rong, Y. y Huang, H., *Advanced Computer-Aided Fixture Design*, Academic Press, 2005.

PREGUNTAS DE REPASO

- 38.1** ¿De qué manera han impactado las computadoras en la manufactura?
- 38.2** Describa los beneficios de las operaciones de manufactura integrada por computadora.
- 38.3** ¿Qué es una base de datos? ¿Por qué es necesaria?
- 38.4** ¿Qué es un archivo STL? ¿Para qué se usa popularmente?
- 38.5** ¿Cuáles son las diferencias entre los términos asistido por computadora e integrado por computadora?
- 38.6** ¿Cuáles son las ventajas de los sistemas CAD sobre los métodos tradicionales de diseño? ¿Hay limitaciones?
- 38.7** ¿Qué significan las abreviaturas siguientes: NURB, DAS, DFX, PDES?
- 38.8** ¿Cuáles son las ventajas principales de la CIM?
- 38.9** Describa los propósitos de la planeación del proceso. ¿Cómo se usan las computadoras en dicha planeación?
- 38.10** Describa las características de una hoja de ruta. ¿Por qué es necesaria?
- 38.11** ¿Cuáles son las ventajas de la simulación de líneas de manufactura?
- 38.12** ¿Qué es la tecnología de grupos? ¿Por qué se desarrolló? Explique sus ventajas.
- 38.13** Explique los tres tipos de códigos de tecnología de grupos: jerárquico, policódigo y árbol de decisiones.
- 38.14** Describa el significado del término sistema de manufactura. ¿Cuáles son sus beneficios?
- 38.15** ¿Qué significa clasificación y codificación en la tecnología de grupos?
- 38.16** ¿Qué tienen en común los sistemas Optiz y KK-3?
- 38.17** Examine una caja de cartón. ¿Es un ejemplo de representación de contorno, modelo sólido o cuerpo de perfil o perfilado?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 38.18** Describa sus observaciones acerca de las figuras 38.1 y 38.2.
- 38.19** Algunos paquetes de software traducen los archivos STL como conjuntos de cuadriláteros de superficie, no triángulos. Explique por qué se puede hacer esto.
- 38.20** Dé ejemplos de formas primitivas de sólidos distintos de los que se muestran en las figuras 38.4a y b.
- 38.21** Describa lo que entienda de la representación octree mostrada en la figura 38.7.
- 38.22** Explique la lógica tras los arreglos que se muestran en la figura 38.12b.
- 38.23** ¿Cuáles son las ventajas de la codificación jerárquica?
- 38.24** ¿Cuál es la diferencia entre un sistema variante y un generativo?
- 38.25** En relación con la figura 38.3, explique las ventajas de una curva Bezier por partes de tercer orden, con respecto a una interpolación B o una curva Bezier convencional.
- 38.26** Dibuje una esfera empleando (a) estructura de alambre; (b) modelos de superficie 3D y (c) formatos STL.
- 38.27** Describa situaciones que requerirían un cambio de diseño del extremo más largo de la parte mostrada en la figura 38.6.
- 38.28** Describa sus reflexiones sobre las diferencias entre el comercio electrónico y las prácticas tradicionales de negocios.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

- 38.29** ¿Cómo describiría el principio de la manufactura asistida por computadora a un trabajador antiguo en una instalación de manufactura que no esté familiarizado con las computadoras?
- 38.30** Revise varias partes manufacturadas que se ilustren en este libro y agrúpelas de forma parecida a las que se muestran en la figura 38.11. Explique.
- 38.31** Piense en una parte sencilla y construya una tabla de árbol de decisiones parecida a la que se ilustra en la figura 38.13.
- 38.32** Revise los arreglos de la máquina mostrada en la figura 38.12 y sugiera cambios que podrían mejorar el flujo de materiales y partes.
- 38.33** Piense en un producto sencillo y haga una hoja de ruta semejante a la que aparece en la figura 38.9. Si se da la misma parte a otra persona, ¿qué tan probable es que la hoja de ruta que desarrolle sea la misma? Explique.
- 38.34** Revise la figura 38.9 y prepare una hoja de ruta para lo siguiente: (a) engrane cilíndrico; (b) álabe de turbina; (c) botella de vidrio; (d) biela y (d) un dado para forja.
- 38.35** Considere una cocina a gran escala, como las que se usan para preparar comidas en las escuelas, hospitales o grandes edificios de oficinas. Haga una lista del equipo necesario, acomode el equipo en una distribución de planta funcional y después en otra celular. Describa sus observaciones sobre las líneas de flujo cuando se preparen comidas diferentes.
- 38.36** Utilizando herramientas de dibujo, construya con cuidado un esquema de la vista terminal de la parte mostrada en la figura 38.6a. Haga el mismo dibujo en un programa CAD. Compare el tiempo requerido para producir cada dibujo.

39.1	Introducción	1124
39.2	Manufactura celular	1125
39.3	Sistemas de manufactura flexible	1126
39.4	Manufactura holónica	1129
39.5	Producción justo a tiempo	1131
39.6	Manufactura esbelta	1132
39.7	Las redes de comunicación en la manufactura	1134
39.8	Inteligencia artificial	1135
39.9	Consideraciones económicas	1138

EJEMPLO:

39.1	Sistemas de manufactura flexible en compañías grandes y pequeñas	1129
------	--	------

- Este capítulo describe la influencia de los sistemas de cómputo y las redes de comunicaciones en el desarrollo y manufactura de productos, así como la integración de todas las actividades relacionadas.
- El capítulo comienza con la descripción de los principios de las células o celdas de manufactura operadas por seres humanos y las que funcionan sin ellos, así como sus características y la forma en que se pueden integrar en los sistemas de manufactura flexible. También se revisa el concepto de manufactura holónica y sus aplicaciones.
- Considerando los aspectos anteriores se describen la producción justo a tiempo, la manufactura esbelta y los sistemas de comunicación.
- El capítulo concluye con el estudio de la inteligencia artificial y los sistemas expertos en cuanto a cómo son aplicados a la manufactura.

39.1 Introducción

Este capítulo se enfoca en la **integración por computadora de las operaciones de manufactura**, donde *integración* significa que los procesos de la manufactura, sus operaciones y administración, se tratan en conjunto como un *sistema*. Una gran ventaja de este método es que las máquinas, herramientas y operaciones de manufactura adquieren ahora una flexibilidad construida internamente, llamada **manufactura flexible**. Como resultado, el sistema es capaz de (a) *responder rápidamente* a los cambios en los tipos de producto y las demandas fluctuantes y (b) asegurar la *entrega a tiempo* de los productos al cliente. La falla en la entrega puntual en un ambiente global tan competitivo tiene efectos muy perjudiciales en las operaciones de una compañía y en su éxito.

Este capítulo describe primero los elementos clave que permiten la ejecución de las funciones necesarias para lograr la manufactura flexible, empezando con la *manufactura celular*, la cual es la unidad básica de la flexibilidad en la producción de bienes. Las células de manufactura se pueden ampliar a *sistemas de manufactura flexible*, con grandes implicaciones para las capacidades de producción. A continuación se describe la *manufactura holónica*, una estrategia de organización de las unidades de manufactura de modo que se logre mayor eficiencia en las operaciones.

A continuación se examina el importante concepto de la *producción justo a tiempo* y sus beneficios, en el cual las partes se producen “justo a tiempo” para que se incorporen a subensambles, ensambles y productos finales. Éste es un método que elimina la necesidad de mantener inventarios (una gran carga financiera para la compañía) y representa un ahorro significativo de espacio para almacenamiento en las instalaciones.

Debido a la necesidad de hacer mucho uso de controles computarizados, hardware y software en todas las actividades mencionadas, la planeación e implementación eficaz de *redes de comunicación* constituyen componentes críticos del conjunto de operaciones de manufactura. El capítulo concluye con la revisión de la *inteligencia artificial*, que consiste en sistemas expertos, de procesamiento de lenguaje natural, de visión de máquina, de redes neuronales artificiales y de la lógica difusa.

39.2 Manufactura celular

Una **célula de manufactura** es una pequeña unidad que consta de una o más estaciones de trabajo. Por lo general, una estación de trabajo contiene una (en cuyo caso recibe el nombre de *célula de una sola máquina*) o varias máquinas (llamada *célula de grupo de máquinas*), donde cada célula realiza una operación diferente. Las máquinas se pueden modificar, recargar de herramientas y reagrupar para diferentes líneas de producto dentro de la misma familia de partes.

La manufactura celular se ha usado hasta este momento sobre todo en operaciones de maquinado, acabado y formado de placas metálicas. Las máquinas herramienta que por lo general se emplean en las células de manufactura son tornos, fresadoras, taladros, rectificadoras y máquinas electroerosionadoras; para el formado de placas es común que el equipo consista en cortadoras, punzonadoras, dobladoras y otras máquinas de formado. El equipo puede incluir máquinas de propósito especial y de control numérico computarizado; también forman parte de una célula de manufactura la inspección y el equipo para realizar ensayos o pruebas automatizadas.

Las capacidades de la manufactura celular generalmente comprenden las operaciones siguientes:

- Carga y descarga de materias primas y piezas en las estaciones de trabajo.
- Cambio de herramientas en las estaciones de trabajo.
- Transferencia de piezas de trabajo y herramientas entre las estaciones.
- Calendarización y control de toda la operación en la célula.

En las células de maquinado *con operador* o atendidas, el operador mueve y transfiere manualmente las materias primas y las partes (a menos que sean demasiado pesadas o los movimientos demasiado peligrosos) o un robot industrial (sección 37.6) ubicado en el centro de la celda.

Células de manufactura flexible. Las células de manufactura se pueden hacer flexibles con el uso de máquinas CNC y centros de maquinado (sección 25.2) y por medio de robots industriales u otros sistemas mecanizados para el manejo de materiales y partes en varias etapas de procesamiento (sección 37.6).

En la figura 39.1 se muestra un ejemplo de *célula de manufactura flexible* (FMC, por sus siglas en inglés) atendida que comprende varias operaciones de maquinado. Observe que los centros de maquinado, equipados con cambiadores automáticos de herramientas y carruseles para las mismas, tienen la capacidad de ejecutar una gran variedad de operaciones (vea la sección 25.2). Una estación de inspección controlada por computadora, con una máquina para medir coordenadas u otro equipo de metrología flexible, es capaz de inspeccionar las dimensiones de una amplia variedad de partes. De este modo, la organización de estas máquinas en una célula permite manufacturar artículos muy diferentes. Con la integración por computadora, una célula de manufactura produce partes en lotes tan pequeños como una sola parte, con demoras insignificantes entre cada lote. La demora real es el tiempo requerido para descargar nuevas instrucciones a la máquina.

Las células de manufactura flexible suelen ser *sin operador* (no atendidas) y su diseño y operación son más exactos que los de otras células. La selección de las máquinas y robots industriales, inclusive los tipos y capacidades de sus efectores finales y sistemas de control, son críticos para el funcionamiento eficaz de la FMC. Igual que sucede con



Código QR 39.1 Célula completamente automatizada para soldadura de barras de pistón. [Fuente: Cortesía de Manufacturing Technology, Inc. (MTI)].

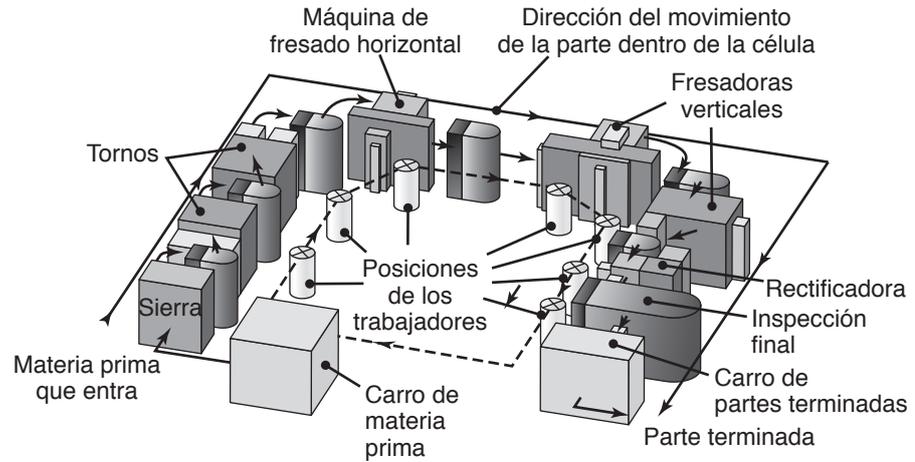


FIGURA 39.1 Ilustración esquemática de una célula de manufactura flexible que muestra diferentes máquinas herramienta y una estación de inspección. *Fuente:* Basado en JT. Black.

otros sistemas de manufactura flexible (sección 39.3), el costo de las FMC es muy alto (vea la tabla 40.6); sin embargo, esta desventaja se compensa con mayor productividad, flexibilidad y facilidad de control.

Diseño de la célula. Dadas las características únicas de las células de manufactura, su diseño y colocación requieren una distribución y organización eficientes de la planta y la consideración de las líneas de flujo del producto (vea *análisis del flujo de producción*, sección 38.8). Las máquinas se pueden acomodar a lo largo de una línea o en forma de U, de L, o en trayectoria circular. La selección de la mejor máquina y el mejor acomodo del equipo para manejo de materiales también incluyen tomar en cuenta los factores de tipo de producto, forma, tamaño y peso, así como la tasa de producción. Al diseñar estas células debe considerarse la probabilidad de que exista un cambio significativo en la demanda de las familias de una parte en particular, con el fin de asegurar que el equipo involucrado tenga la flexibilidad y capacidad requeridas.

39.3 Sistemas de manufactura flexible

Un *sistema de manufactura flexible* (FMS, por sus siglas en inglés) integra todos los elementos principales de la producción en un sistema muy automatizado (figura 39.2); en la figura 39.3 se muestra una vista general de la instalación de un sistema de manufactura flexible en una planta. Utilizados por primera vez a finales de la década de 1960, los FMS consisten en (a) varias células de manufactura, cada una conteniendo un robot industrial que atiende varias máquinas CNC, y (b) un sistema automatizado de manejo de materiales. Un vehículo guiado automáticamente (AGV, sección 37.5) mueve las partes entre las máquinas e inspecciona las estaciones, que pueden involucrar con facilidad un robot industrial o dispositivo de transferencia integral. Todas estas actividades están controladas por una computadora en la que se cargan diferentes instrucciones para el paso de cada parte sucesiva a través de una estación de trabajo en particular. El sistema puede manejar *diversas configuraciones de partes* y las produce *en cualquier orden*.

Un FMS es capaz de optimizar cada etapa de la operación total. Estas etapas involucran (a) uno o más procesos y operaciones, como maquinado, rectificado, corte, formado, metalurgia de polvos, tratamiento térmico y operaciones de acabado; (b) el manejo de materias primas y partes; (c) medición e inspección y (d) ensamble. A la fecha, las aplicaciones más comunes de los FMS han sido en operaciones de maquinado y ensamble.

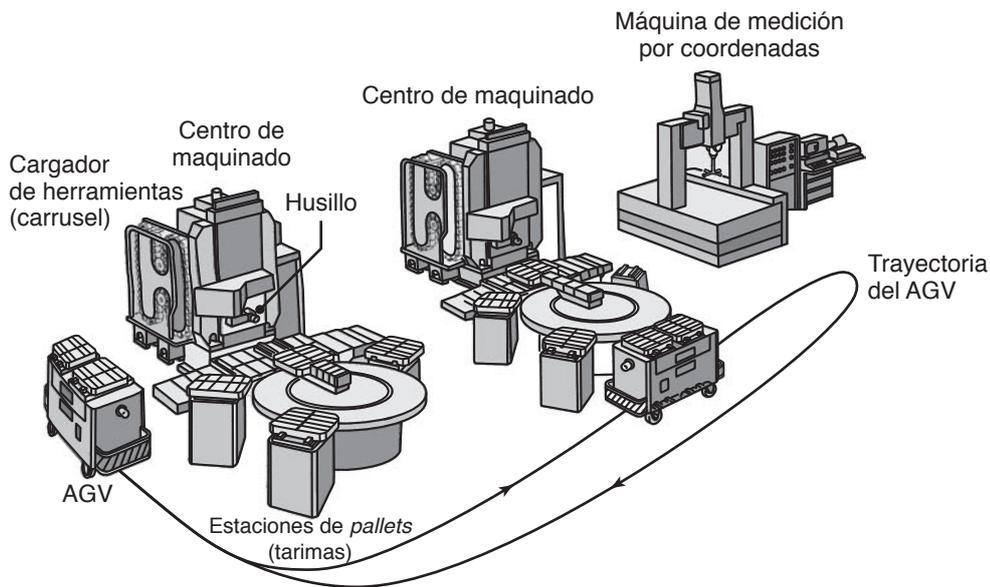


FIGURA 39.2 Ilustración esquemática de un sistema de manufactura flexible; se aprecian dos centros de maquinado, una estación de medición e inspección y dos vehículos guiados automáticamente. *Fuente:* Basado en JT. Black.

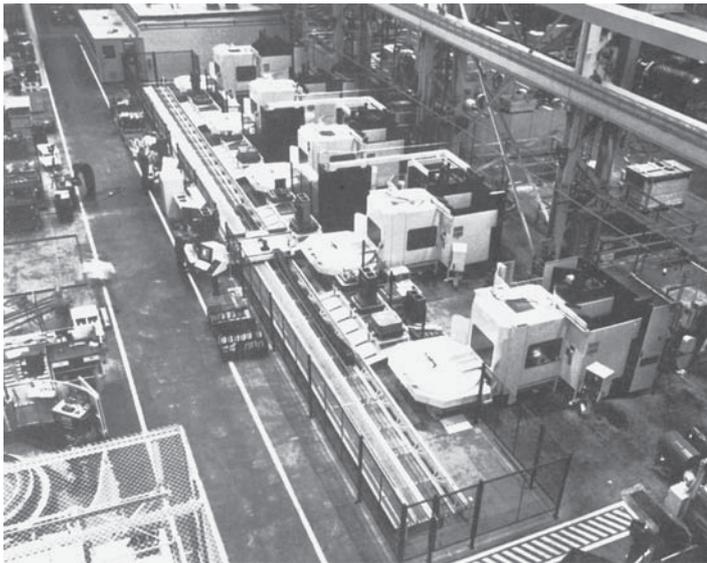


FIGURA 39.3 Vista general de un sistema de manufactura flexible en una planta, con varios centros de maquinado y vehículos guiados automáticamente que se desplazan a lo largo de la línea en el pasillo. *Fuente:* Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

Un sistema de manufactura flexible se puede ver como un sistema que combina los beneficios de dos sistemas: (1) las muy productivas, pero inflexibles, líneas de transferencia y (2) la producción del trabajo en talleres que produce una gran variedad de productos en máquinas independientes, pero es ineficiente (vea también la figura 37.2). Las características relativas de las líneas de transferencia y los FMS se presentan en la tabla 39.1. Observe que con un FMS el tiempo requerido para cambiar a una parte diferente es muy

TABLA 39.1**Comparación de las características generales de las líneas de transferencia y los sistemas de manufactura flexible**

Característica	Línea de transferencia	FMS
Variedad de las partes	Poca	Infinita
Tamaño del lote	>100	1-50
Tiempo para cambiar partes	Largo	Muy corto
Cambio de herramientas	Manual	Automático
Control adaptativo	Difícil	Disponible
Inventario	Abundante	Escaso
Producción durante las descomposturas	Ninguna	Parcial
Justificación para el gasto de capital	Simple	Difícil

corto; el mayor atributo de los FMS es su rápida respuesta para producir y reaccionar ante las variaciones de la demanda del mercado.

En comparación con los sistemas de manufactura convencional, los FMS tienen los siguientes beneficios principales:

- Las partes se producen en cualquier orden, en tamaños de lote tan pequeños como de un artículo, y menor costo unitario.
- Se reducen o eliminan la mano de obra directa y los inventarios.
- Los tiempos de producción requeridos para hacer cambios son cortos.
- Debido a que el sistema se autocorriga, la producción es más confiable y la calidad del producto es uniforme.

Sin embargo, los sistemas de manufactura flexible tienen las siguientes desventajas:

- Los costos del equipo son mayores y la integración por computadora requiere personal altamente capacitado.
- Un FMS por lo general no es apropiado para tasas de producción muy bajas o muy altas.

Elementos de los FMS. Los elementos básicos de un sistema de manufactura flexible son:

- Estaciones de trabajo y células.
- Manejo y transporte automatizados de los materiales y partes.
- Sistemas de control.

Las estaciones de trabajo están distribuidas para lograr la eficiencia más alta en la producción, con un flujo ordenado de materiales y partes en proceso a través del sistema. Los tipos de máquinas presentes en las estaciones de trabajo dependen del tipo de producción. Por ejemplo, para operaciones de maquinado por lo general consisten en varios centros de maquinado de 3 a 5 ejes, tornos CNC, fresadoras, taladros de columna y rectificadoras (descritos en la parte IV). También se incluyen varios equipos, como los de la inspección automatizada (inclusive máquinas de medición por coordenadas), ensamble y limpieza. Además del maquinado, otros tipos de operaciones de manufactura apropiadas para un FMS son el formado de placas metálicas, punzonado, corte y forjado. Los FMS también incorporan equipos diversos, prensas de recorte, instalaciones para tratamiento térmico y equipo de limpieza.

La flexibilidad de los sistemas de manufactura flexible requiere que los sistemas de manejo de materiales se controlen mediante computadora y operen con vehículos guiados automáticamente, bandas transportadoras y diferentes mecanismos de transferencia. Así, los FMS son capaces de llevar a cualquier máquina, en forma aleatoria y en cualquier momento, las materias primas, piezas en bruto y partes en distintas etapas de procesa-

miento. Las *partes prismáticas* por lo general se mueven en **pallets** (tarimas) diseñadas especialmente, mientras que a las que tienen *simetría rotacional* las transportan robots y diferentes dispositivos mecánicos.

Calendarización. En los sistemas de manufactura flexible es esencial la utilización eficiente de las máquinas; éstas no deben permanecer ociosas, de modo que la *calendarización (programación)* y planeación del proceso son cruciales. A diferencia de los trabajos en talleres, donde se sigue una calendarización relativamente rígida para ejecutar un conjunto de operaciones, la calendarización en los FMS es *dinámica*, lo cual significa que es capaz de responder a cambios rápidos del tipo de producto, por lo que responde a decisiones tomadas en tiempo real. El sistema de calendarización en los FMS (a) especifica los tipos de operaciones por realizar en cada parte y (b) identifica las máquinas o células de manufactura en las que tendrán lugar dichas operaciones.

No se desperdicia tiempo en cambiar entre operaciones de manufactura. Sin embargo, se deben vigilar las características, desempeño y confiabilidad de cada unidad del sistema con el fin de garantizar que las partes tengan una calidad y precisión dimensional aceptables antes de que avancen a la siguiente estación de trabajo.

Justificación económica de los FMS. Las instalaciones de FMS significan un gran manejo de capital, que se traduce en costos de millones de dólares. En consecuencia, debe efectuarse un análisis exhaustivo del costo-beneficio de estos sistemas, por lo que se consideran factores como (a) costos de capital, energía, materiales y mano de obra; (b) los mercados esperados para los productos por manufacturar; (c) cualesquiera fluctuaciones anticipadas en la demanda del mercado y el tipo de producto y (d) el tiempo y esfuerzo requeridos para instalar y depurar todo el sistema.

Como se observa en la figura 37.2, las aplicaciones más efectivas de los FMS tienen lugar en la producción por lotes de cantidades medianas. Cuando se ha de producir una variedad o diferentes tipos de partes, los FMS son apropiados para cantidades de producción que generalmente van de 15 000 a 35 000 partes agregadas por año. Sin embargo, la producción de partes individuales con la misma configuración puede alcanzar 100 000 piezas por año. En contraste, la producción de grandes volúmenes de partes de poca variedad se hace mejor si se usan máquinas de transferencia (*equipo especializado o dedicado*). Por último, la producción de partes en volúmenes bajos y mucha variedad se ejecuta de mejor manera con maquinaria estándar convencional (con o sin control numérico) o con el empleo de centros de maquinado.

EJEMPLO 39.1 Sistemas de manufactura flexible en compañías grandes y pequeñas

Muchos fabricantes han considerado por mucho tiempo la implementación de un sistema a gran escala en sus instalaciones. Sin embargo, después de una revisión detallada y con base en la experiencia de compañías parecidas, la mayoría se decide por sistemas más pequeños, sencillos, modulares y menos caros porque

son más rentables. Estos sistemas incluyen células de manufactura flexible (cuyo costo es de unos cuantos cientos de miles de dólares), centros de maquinado independientes y diversas máquinas herramienta CNC que son mucho más fáciles de controlar que un sistema de manufactura flexible.

39.4 Manufactura holónica

La *manufactura holónica* describe una sola organización de unidades de manufactura, mientras que cada componente de un sistema de manufactura holónica es una entidad independiente o completa y, al mismo tiempo, es parte integrante de una organización jerárquica. La palabra *holónica* proviene del griego *holos* (que significa “todo”) y el sufijo *on* (“parte de”).

Los sistemas organizacionales holónicos se han estudiado desde la década de 1960 y en los sistemas biológicos hay varios ejemplos. Las características fundamentales de estos sistemas son las tres siguientes:

1. Los sistemas complejos evolucionarán a partir de sistemas simples mucho más rápido si hay formas intermedias estables que si no las hay; asimismo, los sistemas estables y complejos requieren un sistema jerárquico para su evolución.
2. Los holones (componentes) son simultáneamente entidades completas autocontenidas de sus partes subordinadas y partes dependientes de otros sistemas. Los holones son unidades autónomas y autosuficientes que tienen cierto grado de independencia y pueden manejar las contingencias sin pedir instrucciones a los niveles más altos del sistema jerárquico. Al mismo tiempo, los holones están sujetos al control desde fuentes múltiples de sistemas ubicadas en niveles más altos.
3. Una *holarquía* consiste en (a) entidades completas autónomas a cargo de sus partes y (b) partes dependientes controladas por los niveles más altos de una jerarquía. Las holarquías son coordinadas de acuerdo con su ambiente local.

En los sistemas biológicos las jerarquías tienen las características de (a) estabilidad frente a perturbaciones; (b) uso óptimo de los recursos disponibles y (c) un nivel más alto de flexibilidad cuando su ambiente cambia. Un *holón de manufactura* es un bloque autónomo y cooperativo constituyente de un sistema de manufactura para la producción, almacenamiento y transferencia de objetos o información. Consiste en una parte que controla y otra opcional de procesamiento físico; por ejemplo, un holón puede ser una combinación de una fresadora CNC y su operador, que actúan a través de una interfaz adecuada. Un holón también consiste en otros holones que dan el procesamiento, la información y las interfaces humanas necesarias para el mundo exterior, como un grupo de células de manufactura. Las holarquías se crean y disuelven en forma dinámica, en función de las necesidades en curso del proceso de manufactura en particular.

El punto de vista de los sistemas holónicos con respecto a la operación de manufactura es la de crear un ambiente de abajo hacia arriba. Es posible lograr flexibilidad máxima si se provee inteligencia con holones con el fin de (a) apoyar todas las funciones de producción y control requeridas para llevar a cabo las tareas de producción y (b) administrar el equipo y sistemas subyacentes. El sistema de manufactura se puede reconfigurar a sí mismo dinámicamente en jerarquías operativas para elaborar de manera óptima los productos deseados, con holones o elementos que se agreguen o retiren según se necesite.

Los *sistemas de manufactura holárquica* se basan en la comunicación rápida y eficaz entre holones, en contraste con el control jerárquico tradicional en el que es esencial el poder de procesamiento individual. Aunque se ha propuesto un gran número de arreglos específicos y algoritmos de software para los sistemas holárquicos, la secuencia general de eventos es la siguiente:

1. Una fábrica contiene cierto número de *holones de recursos*, disponibles como entidades separadas en un conjunto de ellos. Los holones disponibles consisten, por ejemplo, en (a) una fresadora CNC y su operador; (b) una rectificadora CNC y su operador o (c) un torno CNC y su operador.
2. Al recibir una orden o directiva de niveles más altos de la estructura jerárquica de la fábrica, se forma un *holón de órdenes* que comienza a comunicarse y a negociar con los holones de recursos disponibles.
3. Las negociaciones conducen a un agrupamiento autorganizado de holones de recursos, que son asignados sobre la base de los requerimientos del producto, de la disponibilidad de los holones de recursos y de las necesidades del cliente. Por ejemplo, un producto dado podría requerir un torno CNC, una rectificadora CNC y una estación de inspección automatizada, con el fin de organizarlos en un *holón de producción*.

4. En caso de fallas, la no disponibilidad de una máquina en particular, o debido a cambios en los requerimientos del cliente, se agregan o retiran otros holones del conjunto de recursos, según sea necesario, lo que permite la reorganización del holón de producción. Los cuellos de botella de producción se identifican y eliminan a través de la comunicación y la negociación entre los holones del conjunto de recursos. La etapa 4 es conocida como *plug and play* (conectar y ejecutar), término tomado de la industria de la computación, en la que componentes de hardware se integran perfectamente en un sistema.

39.5 Producción justo a tiempo

El concepto de *producción justo a tiempo* (JIT, por sus siglas en inglés) se originó en Estados Unidos con las contribuciones originales de Ford Motor Co. y John Deere Corporation. Se implementó por primera vez a gran escala en 1953, en Toyota Motor Company de Japón, con el fin de eliminar el desperdicio de materiales, máquinas, capital, mano de obra e inventarios en todo el sistema de manufactura. El concepto JIT tiene los siguientes objetivos:

- Recibir los suministros justo a tiempo para su uso.
- Producir partes justo a tiempo para incorporarlas en subensambles.
- Producir subensambles justo a tiempo para que se ensamblen en productos terminados.
- Producir y distribuir los productos terminados justo a tiempo para su venta.

En la manufactura tradicional las partes se fabrican por lotes, entran al inventario y luego se usan cuando es necesario. Este enfoque se conoce como sistema de empuje (**push system**), lo cual significa que las partes se manufacturan de *acuerdo con una calendarización* para después formar parte del inventario y usarlas cuando se necesitan. En contraste, el concepto JIT es un **sistema de jale** (pull system), lo que quiere decir que las *partes se producen* sobre pedido, por lo que la producción coincide con la demanda para el ensamble final de los productos.

En el JIT no hay inventarios y la cantidad ideal de producción es una, por lo que también se conoce como *inventario cero, producción sin inventario y calendarización de la demanda*. Además, las partes se inspeccionan conforme se manufacturan y se usan dentro de un breve periodo. De esta manera, un trabajador mantiene el control continuo de la producción e identifica de inmediato las partes defectuosas, ello reduce la variación con el fin de elaborar productos de calidad.

La implementación del concepto JIT requiere que todos los aspectos de las operaciones de manufactura se vigilen y revisen, para que se eliminen todas las operaciones y recursos que no agreguen valor. Este método hace énfasis en (a) el orgullo y dedicación para producir productos de alta calidad; (b) la eliminación de recursos ociosos o en espera y (c) el trabajo en equipo entre los trabajadores, ingenieros y administradores con el fin de resolver con rapidez cualquier problema que surja durante la producción o el ensamble.

La capacidad de detectar problemas en la producción mientras las partes se producen se ha comparado con lo que sucede al nivel del agua (como representación de los *niveles de inventario*) de un lago que cubre una capa de rocas (los *problemas de producción*). Cuando el nivel del agua está alto (analogía de los altos niveles de inventario, asociados con la producción por empuje), las rocas no quedan expuestas. Por el contrario, cuando el nivel del agua es bajo (metáfora de los inventarios bajos, asociados con la producción por jale), las rocas quedan expuestas y se pueden identificar y eliminar. Esta analogía indica que los niveles elevados de inventario enmascaran los problemas de calidad y producción con partes que ya están fabricadas y almacenadas.

El concepto justo a tiempo requiere la entrega oportuna y confiable de todos los suministros y partes desde fuentes externas o de otras divisiones de la compañía, lo

que reduce de manera significativa o elimina el inventario en planta. Se espera que los proveedores entreguen, con frecuencia a diario, artículos inspeccionados previamente conforme se necesitan para la producción y el ensamble. La confiabilidad de los suministros se puede convertir en un problema grave, en particular ante eventos naturales importantes por lo general impredecibles, como terremotos, inundaciones y desastres nucleares.

El enfoque JIT requiere (a) proveedores confiables; (b) cooperación cercana y confianza entre la compañía y sus vendedores y (c) un sistema confiable de transporte; para tener una operación tersa también es importante reducir el número de proveedores.

Ventajas del concepto JIT. Las ventajas principales de la producción justo a tiempo son las siguientes:

- Bajos costos por llevar un inventario.
- Detección rápida de los defectos en la producción o entrega de suministros y, por tanto, pocas pérdidas por desperdicios.
- Inspección y repetición reducidas de partes.
- Productos de alta calidad elaborados a bajo costo.

Aunque hay variaciones significativas en el desempeño, la producción JIT ha resultado en reducciones de 20 a 40% del costo del producto, de 60 a 80% del inventario, hasta de 90% de las tasas de rechazo, 90% del tiempo de ejecución y 50% en desperdicios, repeticiones y costos de garantía. También se han logrado incrementos de 30 a 50% en la productividad de la mano de obra directa y de 60% de la indirecta.

Kanban. La implementación del JIT en Japón implicó el *kanban*, que significa “registros visibles”. Estos registros consistían originalmente en dos tipos de tarjetas (llamadas *kanbans*, hoy reemplazadas por códigos de barras y otros dispositivos):

- La *tarjeta de producción*, que autoriza la producción de un contenedor o carro de partes idénticas y especificadas en una estación de trabajo.
- La *tarjeta de transporte* o *tarjeta de movimiento*, que autoriza la transferencia de un contenedor o carro de partes de una estación de trabajo en particular a otra donde se usarán las partes.

Las tarjetas o etiquetas contienen información sobre (a) tipo de parte; (b) ubicación donde se emitió la tarjeta; (c) número de parte y (d) número de artículos en el contenedor. El número de contenedores en circulación en cualquier momento se controla por completo y se puede programar como se requiera para tener una máxima eficiencia en la producción.

39.6 Manufactura esbelta

En un ambiente de manufactura moderno, las compañías deben responder a las necesidades de los clientes y sus requerimientos específicos y a las demandas fluctuantes del mercado global. Al mismo tiempo, para garantizar su competitividad, la tarea de manufactura debe conducirse con una cantidad mínima de recursos desperdiciados. Esto ha llevado al desarrollo de estrategias de *producción esbelta* o *manufactura esbelta*.

La manufactura esbelta contempla las siguientes etapas:

1. **Identificar el valor.** El punto de arranque crítico para el pensamiento esbelto es el reconocimiento del *valor*, el cual sólo puede ser hecho por un cliente y considerando el producto del cliente (vea también la sección 40.10.1). El objetivo de cualquier organización es producir un artículo que un cliente quiera y al precio, en la ubicación, el tiempo y volumen deseados. La entrega del bien o servicio equivocados produce desperdicio, aun cuando se entregue con toda eficiencia. Es importante

identificar todas las actividades del fabricante, desde el *punto de vista del cliente* y *optimizar procesos* para maximizar el valor agregado. Este punto de vista tiene importancia crítica, ya que ayuda a identificar si una actividad o servicio:

- a. Agrega valor de manera notoria.
 - b. No agrega valor, pero no puede evitarse.
 - c. No agrega valor y puede evitarse.
2. **Identificar las corrientes de valor.** Una *corriente de valor* es el conjunto de todas las acciones requeridas para producir un artículo, lo que incluye:
- a. Diseño del producto y desarrollo de tareas, apelando a todas las acciones desde el concepto, el diseño detallado, y hasta el lanzamiento de la producción.
 - b. Tareas de administración de la información, lo que implica la toma de pedidos, su calendarización detallada y entrega.
 - c. Tareas físicas de producción, por medio de las cuales las materias primas se convierten en un producto terminado entregado al consumidor.
3. **Hacer que fluya la corriente de valor.** El *flujo* se alcanza cuando las partes encuentran un mínimo de tiempo de ocio, o muerto, entre cualquier operación sucesiva. Se ha observado que el flujo es más fácil de lograr en la producción en masa, pero es más difícil para la producción de lotes pequeños. Sin embargo, la producción por lotes involucra de manera inherente algo de tiempo de ocio; esto debe evitarse porque los métodos del justo a tiempo son esenciales. En tales casos, la solución es usar células de manufactura, donde se requiere un mínimo de tiempo y esfuerzo para cambiar de un producto a otro; un producto en fabricación encuentra un flujo continuo sin importar la tasa de producción.

Además de los enfoques del JIT, para establecer el flujo del producto a través de las fábricas se requiere lo siguiente:

- Eliminar los tiempos de espera, que tal vez sean causados por cargas de trabajo desbalanceadas, mantenimiento no planeado o problemas de calidad; por tanto, la eficiencia de los trabajadores debe maximizarse en todo momento.
 - Nivelar o balancear la producción, la cual varía en diferentes momentos del día o según el día de la semana; la producción dispareja ocurre cuando las máquinas se subutilizan, lo que invariablemente genera tiempos de espera y desperdicio. Si la producción se nivela el inventario se reduce, la productividad se incrementa y el flujo del proceso es más fácil de lograr. También debe observarse que el balance puede darse a escalas de una célula, una línea y la planta.
 - Eliminar las operaciones y etapas innecesarias o adicionales, ya que representan costos.
 - Minimizar o eliminar movimientos de partes o productos en las plantas porque representan una actividad que no agrega valor. Este desperdicio puede, por ejemplo, eliminarse o minimizarse utilizando células de manufactura o mejores distribuciones de la planta.
 - Realizar estudios de tiempos y movimientos para evitar desplazamientos innecesarios de las partes o productos, o para identificar a los trabajadores ineficientes.
 - Eliminar los defectos de las partes.
 - Evitar la dependencia de un proveedor único, en especial debido a los eventos imprevistos relacionados con desastres naturales y conflictos regionales.
4. **Establecer el sistema de jale.** Se ha observado que una vez que las corrientes de valor fluyen, se logran ahorros significativos en términos de reducción del inventario, así como por los aumentos de la eficiencia en el desarrollo del producto, el procesamiento de los pedidos y la producción. En ciertos casos se han obtenido ahorros de hasta 90% en el tiempo real de producción. En estas circunstancias es posible establecer la *manufactura por jale* (sección 39.5), en la que los artículos se producen

por orden del consumidor o por continuidad de la máquina, y no en lotes que en última instancia no se desean ni crean valor.

5. **Alcanzar la perfección.** Como se describe en la sección 36.1, el término *kaizen* significa mejora continua, y es evidente que en todas las organizaciones existe la necesidad de la mejora continua. Con los métodos de la manufactura esbelta se ha descubierto que la mejora continua se acelera, con lo que es posible tener producción sin desperdicios. Además, con la adopción de los principios de la manufactura esbelta, las compañías obtienen un beneficio inicial, conocido como *kaikaku* o “mejora radical”.

39.7 Las redes de comunicación en la manufactura

Con el fin de mantener un nivel alto de coordinación y eficiencia de operación en la manufactura integrada, es esencial contar con una *red de comunicaciones* extensa, de alta velocidad e interactiva. La *red de área local* (LAN, por sus siglas en inglés) es un sistema de hardware y software en el que se comunican entre sí grupos de máquinas y equipos relacionados lógicamente. Una LAN conecta estos grupos uno con otro, lo que lleva las diferentes fases de la manufactura a la operación unificada.

Una LAN puede ser muy grande y compleja y conectar cientos o miles de máquinas y equipos en varios edificios de una organización. Es común usar distintos patrones de redes de fibra óptica o cables de cobre, en distancias que van desde algunos metros hasta 32 kilómetros (20 millas); para distancias más grandes se utilizan *redes de área amplia* (WAN, por sus siglas en inglés). Los diferentes tipos de redes se conectan o integran por medio de “puertos de enlace” y “conectores o puentes” (gateways y bridges), con frecuencia con el uso de *protocolos de transferencia de archivos* (FTP, por sus siglas en inglés) seguros a través de conexiones de internet. En las redes de manufactura se han implementado y aplicado varios protocolos avanzados de red, inclusive *ipV6* (protocolo de internet versión 6). En la década de 1970 se desarrolló el *sistema de acceso múltiple de portación de sentido con detección de colisión* (CSMA/CD, por sus siglas en inglés) y se implementó *Ethernet*, el cual es hoy el estándar de la industria.

Las redes de área local convencionales requieren cableado, con frecuencia a través de paredes de mampostería y otras estructuras permanentes, y se necesita que las computadoras y maquinaria permanezcan estacionarias. Las *redes inalámbricas de área local* (WLAN, por sus siglas en inglés) permiten que el equipo, como sitios móviles de prueba o dispositivos de obtención de datos (por ejemplo, lectores de código de barras), mantenga fácilmente la conexión a la red. Actualmente, un estándar de comunicación (IEEE 802.11) define las frecuencias y especificaciones de las señales para las WLAN, así como dos métodos de radiofrecuencia y uno infrarrojo. Aunque las redes inalámbricas son más lentas que las cableadas, su flexibilidad las hace preferibles, en especial en situaciones donde la principal aplicación son tareas lentas, como el monitoreo de las máquinas.

Las redes de área personal (PAN, por sus siglas en inglés) se usan para dispositivos electrónicos como teléfonos celulares y asistentes personales de datos, pero no están extendidas entre las aplicaciones de manufactura. Las PAN se basan en estándares de comunicación (como Bluetooth, IrDA y HomeRF) y están diseñadas para permitir la comunicación de datos y voz a cortas distancias. Por ejemplo, un equipo con Bluetooth de corto alcance permitirá la comunicación en una distancia de hasta 10 m (32 pies). Las PAN están experimentando cambios importantes y sus estándares de comunicación se refinan continuamente.

Estándares de comunicación. Es común que una célula de manufactura se construya con máquinas y equipos comprados a un proveedor, que otra célula tenga máquinas adquiridas con otro proveedor y una tercera se haya comprado a otro más. Como resultado, hay varios equipos programables involucrados y dirigidos por distintas computadoras



FIGURA 39.4 Equipo de comunicaciones iBlue con un micrómetro (arriba), una sonda de dureza (en medio) y una sonda térmica (abajo). El iBlue es del mismo tamaño que un teléfono móvil y usa el estándar MTConnect para comunicarse con instrumentos y maquinaria. *Fuente:* Cortesía de J. Neidig, ITAMCI, Inc.

y microprocesadores, comprados en diferentes momentos a distintos proveedores, que tienen capacidades y niveles de sofisticación desiguales.

MTConnect surgió en 2008. Se trata de un *protocolo de comunicaciones* para máquinas herramienta desarrollado por la Association for Manufacturing Technology, el cual se ha convertido con rapidez en un estándar industrial (ayudado por su disponibilidad libre de tarifas). MTConnect usa *protocolos de transferencia de hipertexto* (http) para la comunicación de datos apropiados para todos los fabricantes de máquinas herramienta. Existe software muy extendido para recuperar datos de máquinas herramienta, llamados *agentes*, e incluso lo hay para tabletas, teléfonos inteligentes o dispositivos de diseño especial basados en Bluetooth, como iBlue (vea la sección 39.4). Este protocolo facilita mucho la obtención de datos de manufactura, el seguimiento de la utilización de las máquinas y las tasas de producción, así como otras formas de datos, lo que permite administrar la planta en tiempo real.

39.8 Inteligencia artificial

La *inteligencia artificial* (AI, por sus siglas en inglés) es la parte de la ciencia de la computación relacionada con sistemas que tienen algunas características que generalmente se asocian con la inteligencia humana: aprendizaje, razonamiento, solución de problemas, reconocimiento de patrones y entendimiento del lenguaje. El objetivo de la AI es simular dichos comportamientos en la computadora. El arte de hacer que los principios y herramientas relevantes de la inteligencia artificial resuelvan problemas de aplicación difíciles se conoce como **ingeniería del conocimiento**.

La inteligencia artificial ha tenido un gran efecto en el diseño, la automatización y rentabilidad general de la operación de manufactura, sobre todo gracias a los avances en la expansión de la memoria de cómputo (vea diseño de chips VLSI; capítulo 28, en la página web del libro) y los costos reducidos. Se han desarrollado paquetes de inteligencia artificial que cuestan algunos miles de dólares, muchos de los cuales corren en computadoras personales económicas.

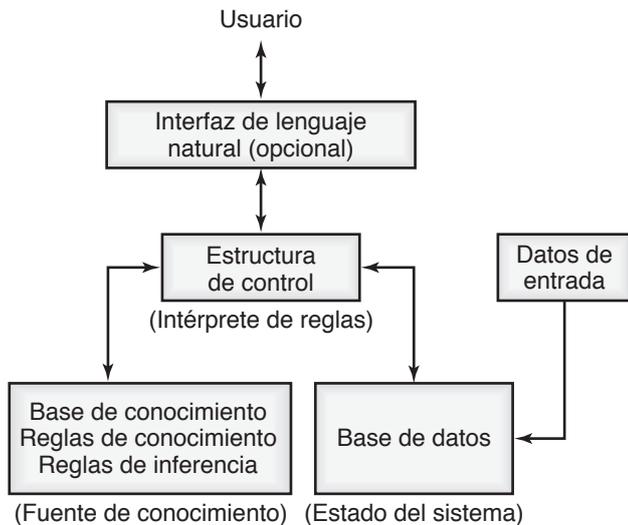


FIGURA 39.5 Estructura básica de un sistema experto. La base de conocimiento consiste en reglas de conocimiento (información general sobre el problema) y reglas de inferencia (la forma en que se llega a conclusiones); los resultados se comunican al usuario por medio de la interfaz de lenguaje natural.

Sistemas expertos. Un *sistema experto* (ES, por sus siglas en inglés), también llamado **sistema basado en el conocimiento**, por lo general se define como un programa de cómputo inteligente que tiene la capacidad de resolver problemas de la vida real con el empleo de procedimientos **basados en el conocimiento** y la **inferencia** (figura 39.5). El objetivo de un sistema experto es realizar tareas demandantes en lo intelectual en la forma en que lo haría un experto humano.

El campo del conocimiento requerido para ejecutar la tarea en cuestión se llama **dominio** del sistema experto. Los sistemas expertos utilizan una base de conocimiento que contiene hechos, datos, definiciones y suposiciones. También tienen la capacidad de adoptar un método **heurístico**: hacer juicios correctos con base en el descubrimiento y la revelación y hacer elecciones de alta probabilidad, exactamente como lo haría un experto humano.

La base de conocimiento se expresa en código de computadora, por lo general en forma de **reglas si-entonces**, y genera una serie de preguntas. El mecanismo para usar estas reglas para resolver problemas se llama **motor de inferencia**. Los sistemas expertos se pueden comunicar con otros paquetes de software (computacionales).

Para construir sistemas expertos con el fin de resolver los complejos problemas de diseño y manufactura que se encuentran en la vida real se necesita un gran dominio del

conocimiento y un mecanismo para manipularlo y obtener soluciones. Debido a la dificultad implícita en (a) modelar con precisión todos los años de experiencia de un experto, o equipo de expertos, y (b) las complejas capacidades de razonamiento inductivo y toma de decisiones que tienen los seres humanos (inclusive la de aprender de los errores), el desarrollo de sistemas basados en el conocimiento requiere una considerable cantidad de tiempo y esfuerzo.

Los sistemas expertos operan en tiempo real y sus breves tiempos de reacción brindan respuestas rápidas a los problemas. Los lenguajes de programación de uso más común para estas aplicaciones son C++, Java y Python, además de otros lenguajes disponibles. Un aspecto importante del software de sistemas expertos son los programas con interfaz al **usuario** o de **entorno**, también llamados **sistemas de infraestructura digital**. En esencia, estos paquetes son lineamientos de sistemas expertos que permiten que una persona escriba aplicaciones específicas que se adapten a necesidades especiales; la escritura de estos programas requiere de experiencia y tiempo considerables.

Se han desarrollado varios sistemas expertos que utilizan computadoras con diferentes capacidades y para aplicaciones especializadas como las siguientes:

- Diagnóstico de problemas en varios tipos de máquinas y equipos y determinación de las acciones correctivas.
- Modelado y simulación de instalaciones de producción.
- Diseño asistido por computadora, planeación del proceso y calendarización de la producción.
- Administración de la estrategia de manufactura de una compañía.

Procesamiento de lenguaje natural. Tradicionalmente, la recuperación de información de una base de datos en la memoria de una computadora ha requerido la utilización de programadores que traduzcan preguntas del lenguaje natural a “búsquedas” en algún lenguaje de máquina. Las interfaces de *lenguaje natural* con sistemas de bases de datos, los cuales están en desarrollo permanente, permiten al usuario recuperar información con la introducción de comandos en inglés u otro idioma en forma de preguntas sencillas escritas con el teclado.

Existen programas con interfaz al usuario que se usan en aplicaciones como la calendarización del flujo del material en las plantas de manufactura y el análisis de la infor-

mación de las bases de datos. Se tienen avances continuos en el desarrollo de software de cómputo relacionado con la síntesis y el reconocimiento del habla (**reconocimiento de voz**), con el fin de eliminar la necesidad de escribir comandos en teclados.

Visión de máquina. En la *visión de máquina* (sección 37.7.1) se combinan computadoras y software, que implementan inteligencia artificial, con cámaras y otros sensores ópticos (figura 39.6). Después, estas máquinas ejecutan operaciones como inspección, identificación y clasificación de partes, así como guía de robots (vea *robots inteligentes*; sección 37.6.2), operaciones que de otra manera requerirían la intervención humana.

Redes neuronales artificiales. Aunque las computadoras son mucho más rápidas que el cerebro humano para efectuar tareas secuenciales, los humanos son mucho mejores en tareas basadas en patrones que se realizan con procesamiento paralelo, como el reconocimiento de rasgos (en caras y voces, aun en condiciones de ruido), evaluar con rapidez situaciones y ajustarse a condiciones nuevas y dinámicas. Estas ventajas también se deben en parte a la habilidad de los seres humanos para usar sus cinco sentidos (vista, oído, olfato, gusto y tacto) en tiempo real y de manera simultánea, lo que se llama *fusión de datos*. La rama de la inteligencia artificial llamada *redes neuronales artificiales* (ANN, por sus siglas en inglés) intenta que se adquieran algunas de estas capacidades a través imitar en una computadora la forma en que el cerebro humano procesa esos datos.

El cerebro humano tiene alrededor de 100 000 millones de **neuronas** conectadas (células que son la unidad fundamental de funcionamiento del tejido nervioso) y conexiones por más de mil veces esa cantidad. Cada neurona ejecuta exactamente una tarea simple: recibe señales de entrada de un conjunto fijo de neuronas; cuando dichas señales de entrada se relacionan de cierta manera (específica de esa neurona en particular), se genera una señal electroquímica de salida que va a un conjunto fijo de neuronas. Ahora se piensa que el aprendizaje humano se efectúa mediante cambios en las intensidades de estas señales entre las conexiones de las neuronas.

Las redes neuronales artificiales se emplean en aplicaciones como la reducción de ruido (en los teléfonos), reconocimiento del habla y control del proceso. Por ejemplo, se usan para predecir el acabado superficial de una pieza de trabajo obtenido por medio del fresado de acabado, con base en parámetros de entrada como fuerza de corte, torque, emisión acústica y aceleración del husillo.

Lógica difusa. Un elemento de la inteligencia artificial que tiene aplicaciones importantes en los sistemas de control y reconocimiento de patrones es la *lógica difusa*, también llamada *modelos difusos* o *razonamiento difuso*. Los modelos difusos se originaron en 1965 con base en la observación de que las personas pueden tomar buenas decisiones

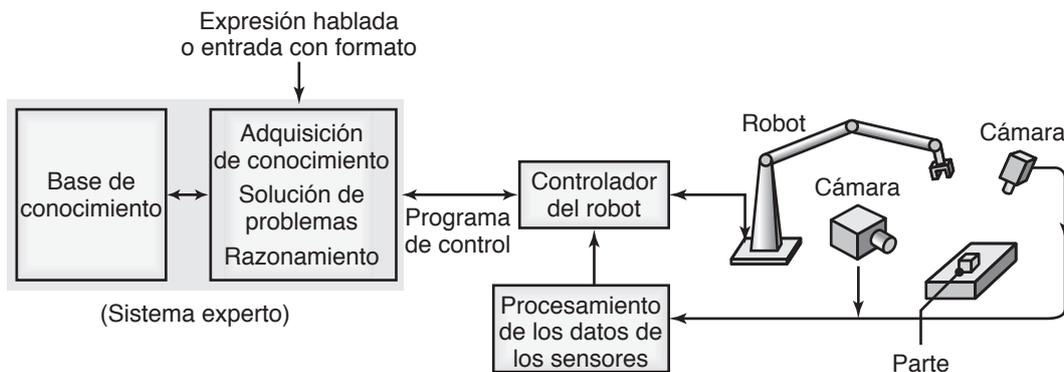


FIGURA 39.6 Ilustración de un sistema experto en cuanto a cómo es aplicado a un robot industrial guiado por visión de máquina.

a partir de información imprecisa y no numérica; los modelos difusos son básicamente medios matemáticos que representan información vaga e imprecisa, de ahí el término “difuso”.

Estos modelos tienen la capacidad de reconocer, representar, manipular, interpretar y utilizar datos e información vagos o carentes de precisión. Los modelos difusos tienen que ver con el razonamiento y la toma de decisiones a un nivel más alto que el de las redes neuronales. Ejemplos lingüísticos comunes son las palabras: *poco, muy, más o menos, pequeño, mediano, extremadamente y casi todo*.

Se han desarrollado tecnologías y dispositivos difusos y se han aplicado con éxito en áreas como la robótica y el control de movimientos, procesamiento de imágenes y visión de máquina, aprendizaje de máquinas y diseño de sistemas inteligentes. Algunas aplicaciones incluyen (a) la transmisión automática de automóviles; (b) una lavadora que ajusta en forma automática el ciclo de lavado según el tamaño de la carga, tipo de tela y cantidad de suciedad, y (c) un helicóptero que obedece comandos a través de la voz para avanzar, subir, ir hacia a la izquierda, a la derecha, realizar un vuelo estacionario y aterrizar.

39.9 Consideraciones económicas

Las consideraciones económicas para implementar las diferentes actividades integradas por computadora descritas en este capítulo son críticas en vista de sus muchas complejidades y los altos costos que implican. Las instalaciones para los sistemas de manufactura flexible son intensivas en cuanto al uso de capital, por lo que se requiere hacer un análisis exhaustivo de costo-beneficio que incluya lo siguiente:

- Costos de capital, energía, materiales y mano de obra.
- Mercados que se espera para los productos que se han de hacer.
- Fluctuaciones anticipadas en la demanda del mercado y el tipo de producto.
- Tiempo y esfuerzo requeridos para instalar y depurar el sistema.

Lo común es que se requieran de dos a cinco años para instalar un sistema de manufactura flexible y unos cuantos meses para depurarlo. Aunque se requieren pocos, o ninguno, operadores de máquina, el personal a cargo de la operación total debe ser capacitado y muy hábil; este personal también incluye ingenieros de manufactura, programadores de computadoras e ingenieros de mantenimiento. Las aplicaciones más eficaces de FMS han sido en la producción de lotes de volumen medio. Cuando se tiene que producir una variedad de partes, los FMS son apropiados para fabricar volúmenes de 15 000 a 35 000 partes por año; para partes individuales que tengan la misma configuración, la producción puede alcanzar las 100 000 unidades por año. En contraste, la manufactura de partes en grandes volúmenes y poca variedad se efectúa mejor por medio de máquinas de transferencia (vea *equipo especializado*, sección 37.2.4). La producción de partes en poco volumen y gran variedad es mejor hacerla en maquinaria estándar convencional, con o sin control numérico, o utilizando centros de maquinado (sección 25.2).

RESUMEN

- Los sistemas de manufactura integrada se implementan en diferentes grados para optimizar las operaciones, mejorar la calidad del producto y reducir los costos.
- Los sistemas de manufactura integrada por computadora se han vuelto los medios más importantes para mejorar la productividad, responder a las demandas cambiantes del mercado e intensificar el control de las funciones de manufactura y administración.
- Los avances en la manufactura holónica, la producción justo a tiempo y las redes de comunicaciones son elementos esenciales para mejorar la productividad.
- La manufactura esbelta busca identificar y eliminar el desperdicio con el fin de alcanzar mejoras en la calidad del producto, satisfacción del cliente y disminución del costo.

- La inteligencia artificial crea nuevas oportunidades en todos los aspectos de la ingeniería y tecnología de la manufactura.
- Las consideraciones económicas del diseño e implementación de sistemas de manufactura integrados por computadora, en especial los de manufactura flexible, son de importancia crucial debido a los grandes montos de capital que se requieren.

TÉRMINOS CLAVE

Ambientes	Kanban	Producción justo a tiempo	Sistemas de infraestructura digital
Célula de manufactura	Lógica difusa	Red de área local	Sistemas de manufactura integrada por computadora
Desperdicio	Manufactura celular	Red de comunicaciones	Sistemas expertos
Estándar de comunicaciones	Manufactura esbelta	Redes inalámbricas	Valor
Ethernet	Manufactura flexible	Redes neuronales artificiales	Visión de máquina
Flujo	Manufactura holónica	Reglas si-entonces	
Herramientas de internet	Motor de inferencia	Sistema basado en el conocimiento	
Ingeniería del conocimiento	Pallets (tarimas)	Sistema de empuje	
Inteligencia artificial	Procesamiento de lenguaje natural	Sistema de jale	
Inventario cero			

BIBLIOGRAFÍA

- Black, J. R., *Lean Production*, Industrial Press, 2008.
- Black, J. T. y Hunter, S. L., *Lean Manufacturing Systems and Cell Design*, Society of Manufacturing Engineers, 2003.
- Bodek, N., *Kaikaku: The Power and Magic of Lean*, PCS Press, 2004.
- Conner, G., *Lean Manufacturing for the Small Shop*, 2a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 2008.
- Deen, S. M. (ed.), *Agent-Based Manufacturing: Advances in the Holonic Approach*, Springer, 2003.
- Giarratano, J. C. y Riley, G. D., *Expert Systems: Principles and Programming*, 4a. ed., Course Technology, 2004.
- Irani, S. A. (ed.), *Handbook of Cellular Manufacturing Systems*, Wiley, 1999.
- Jackson, P., *Introduction of Expert Systems*, 3a. ed., Addison Wesley, 1998.
- Koren, Y., *The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*, Wiley, 2010.
- Liker, J. y Convys, G. L., *The Toyota Way to Lean Leadership*, McGraw-Hill, 2011.
- Meyers, F. E. y Stewart, J. R., *Motion and Time Study for Lean Manufacturing*, 3a. ed., Prentice Hall, 2001.
- Myerson, P., *Lean Supply Chain and Logistics Management*, McGraw-Hill, 2012.
- Negnevitsky, M., *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*, 2a. ed., Addison Wesley, 2004.
- Ortiz, C. A., *Kaizen Assembly: Designing, Constructing, and Managing a Lean Assembly Line*, CRC Press, 2006.
- Padhy, N. P., *Artificial Intelligence and Intelligent Systems*, Oxford University Press, 2003.
- Rehg, J. A., *Introduction to Robotics in CIM Systems*, 5a. ed., Prentice Hall, 2002.
- Rehg, J. A. y Kraebber, H. W., *Computer-Integrated Manufacturing*, 3a. ed., Prentice Hall, 2004.
- Russell, S. y Norvig, P., *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 3a. ed., Prentice Hall, 2009.
- Siler, W. y Buckley, J. J., *Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning*, Wiley-Interscience, 2004.
- Wilson, L., *How to Implement Lean Manufacturing*, McGraw-Hill, 2009.

PREGUNTAS DE REPASO

- 39.1** ¿Qué es una célula de manufactura? ¿Por qué se desarrolló?
- 39.2** Describa el principio básico de los sistemas de manufactura flexible.
- 39.3** ¿Por qué un sistema de manufactura flexible es capaz de producir un amplio rango de tamaños de lote?
- 39.4** ¿Cuáles son los beneficios de la producción justo a tiempo? ¿Por qué se le llama sistema de jale?
- 39.5** Explique la función de una red de área local.
- 39.6** ¿Qué es un sistema experto?
- 39.7** ¿Cuáles son las ventajas de un estándar de comunicaciones?
- 39.8** ¿Qué es MTConnect?
- 39.9** ¿Qué es una WLAN? ¿Y una PAN?

39.10 Describa lo que entiende por manufactura holónica.

39.11 ¿Qué es kanban? Explique.

39.12 ¿Qué es manufactura esbelta?

39.13 ¿Qué es un sistema de empuje?

39.14 En el concepto de manufactura esbelta, ¿qué significa corriente de valor?

39.15 Describa los elementos de la inteligencia artificial. La visión de máquina, ¿forma parte de ella? Explique.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

39.16 ¿En qué formas han influido las computadoras en la manufactura? Explique.

39.17 ¿Qué ventajas hay en ver a la manufactura como un sistema? ¿Cuáles son los componentes de un sistema de manufactura?

39.18 Un restaurante hace emparedados conforme los ordenan los clientes. Otro restaurante competidor los hace por adelantado y los vende desde su inventario a los consumidores. ¿Cuál es el sistema de jale y cuál el de empuje? Explique cuál restaurante hace los mejores emparedados.

39.19 Analice los beneficios de las operaciones de manufactura integradas por computadora.

39.20 (a) ¿Por qué en un sistema de manufactura esbelta se requiere la producción justo a tiempo? (b) ¿Qué desventajas hay en el justo a tiempo?

39.21 Los centros de maquinado, ¿serían apropiados para la producción justo a tiempo? Explique.

39.22 Presente un ejemplo de un sistema de empuje y otro de sistema de jale. Indique la diferencia fundamental entre los dos métodos.

39.23 ¿Qué es una lógica difusa? Proponga tres ejemplos en los que usted en lo personal haya tomado decisiones basadas en lógica difusa.

39.24 ¿Cuáles son las ventajas de tener niveles de producción entre las líneas y con respecto al tiempo?

39.25 ¿Hay un mínimo en el número de máquinas a incorporar en una célula de manufactura? Explique.

39.26 ¿Los robots siempre son un componente de las FMC? Explique.

39.27 ¿Hay desventajas en el inventario cero? Explique.

39.28 Revise la tabla 36.1 e identifique los puntos que sean consistentes con la manufactura flexible.

39.29 Ofrezca ejemplos de procesos y operaciones de manufactura en los que sea eficaz la inteligencia artificial.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

39.30 Piense en una línea de productos para un artículo de uso común en el hogar y diseñe una célula de manufactura para fabricarlo. Describa las características de las máquinas y equipos involucrados.

39.31 ¿Qué tipos de (a) productos y (b) máquinas de producción no serían apropiados para las células de manufactura flexible? ¿Qué características de diseño o manufactura no serían adecuados? Explique con ejemplos.

39.32 Describa sus opiniones con respecto a las capacidades de reconocimiento de voz de las máquinas y controles del futuro.

39.33 ¿Podría estar una fábrica completamente sin atención? Explique.

39.34 Suponga que usted posee una compañía de manufactura y sabe que no ha aprovechado todas las ventajas de los avances tecnológicos desarrollados al respecto. Sin embargo, ahora le gustaría hacerlo y tiene el capital necesario. Describa cómo analizaría las necesidades de su compañía y cómo planearía implementar dichas tecnologías. Considere los aspectos técnicos y humanos.

39.35 ¿Cómo describiría los beneficios de los sistemas de manufactura flexible a un trabajador de edad avanzada, en una planta de manufactura, cuya experiencia sólo ha sido la de operar máquinas herramienta sencillas?

39.36 Las redes neuronales artificiales son útiles en particular en los problemas mal definidos y en los que hay datos vagos. Dé ejemplos de manufactura donde sean útiles las redes neuronales artificiales.

39.37 Algunas personas han sugerido que los sistemas de inteligencia artificial sustituirán en definitiva al cerebro humano. ¿Está usted de acuerdo? Explique.

39.38 Evalúe un proceso desde la perspectiva de la producción esbelta. Por ejemplo, observe de cerca lo siguiente e identifique, elimine (cuando sea posible), u optimice los pasos de la producción de desperdicios al (a) preparar el desayuno para un grupo de ocho personas; (b) lavar ropa o automóviles; (c) usar software de navegación en internet y (d) estudiar para un examen, redactar un informe breve o escribir un examen.

39.39 El sistema de jale se puede lograr si se trabaja con un proveedor y se desarrolla un flujo balanceado de los productos. Sin embargo, se ha dicho que debería evitarse depender de un solo proveedor por razones de los sucesos imprevistos de desastres naturales. Escriba un informe de una página que explique esta paradoja.

39.40 (a) Explique cómo haría más esbeltos sus hábitos de estudio. (b) Haga una búsqueda en internet y enumere cinco paquetes de software que incorporen MTConnect.

Diseño y manufactura del producto en un ambiente competitivo

CAPÍTULO 40

- La manufactura de productos de alta calidad al menor costo posible es crítica en una economía global.
- Este capítulo describe los factores interrelacionados en el diseño, desarrollo y manufactura del producto; comienza con un análisis del diseño del producto y la evaluación del ciclo de vida en el diseño y la manufactura.
- Luego se estudia la importancia de las consideraciones de energía en la manufactura y su rol en los costos de producción.
- Después se describe la selección del material y del proceso, así como sus efectos en el diseño y la manufactura, seguido del análisis de los factores económicos involucrados en la fabricación de un producto.
- Por último se presenta el principio del análisis del valor, junto con un estudio de cómo ayuda a optimizar las operaciones de manufactura y a minimizar el costo del producto.

40.1 Introducción

En un mercado global cada vez más competitivo, la fabricación de productos de alta calidad al costo más bajo posible requiere la comprensión de las interrelaciones, con frecuencia complejas, que tienen lugar entre numerosos factores. A lo largo de todo este libro se ha indicado que:

1. El diseño del producto, la selección de los materiales y los procesos de manufactura están interrelacionados.
2. En ocasiones se modifican los diseños para (a) mejorar el desempeño del producto; (b) buscar una base de cero rechazos y desperdicio; (c) hacer que los productos sean más fáciles y rápidos de manufacturar y (d) considerar nuevos materiales y procesos que están en continuo desarrollo.

Debido a la creciente variedad de materiales y procesos de manufactura que existen hoy en día, la tarea de producir un artículo de alta calidad con la selección de los mejores materiales y procesos, mientras se minimizan los costos, sigue siendo un reto importante, al igual que una oportunidad. El término **clase mundial** se usa mucho para indicar altos niveles de calidad del producto, lo que quiere decir que los productos deben cumplir estándares internacionales y ser aceptables y susceptibles de comercializarse en el mercado mundial.

Para una compañía, el ser de clase mundial, tal como sucede con la calidad de un producto, no es algo fijo por alcanzar sino un *objetivo móvil*, lo que también se conoce como *mejora continua*, para llegar a niveles cada vez más altos. Por tradición, la *selección de materiales* para los productos ha requerido mucha experiencia; sin embargo,

40.1	Introducción	1141
40.2	Diseño del producto	1142
40.3	Calidad del producto	1145
40.4	Evaluación del ciclo de vida y manufactura sustentable	1145
40.5	Consumo de energía durante la manufactura	1147
40.6	Selección del material para los productos	1149
40.7	Sustitución de materiales	1151
40.8	Capacidades del proceso de manufactura	1153
40.9	Selección del proceso	1155
40.10	Costos de manufactura y su reducción	1158

EJEMPLOS:

40.1	Manufactura sustentable de los zapatos deportivos Nike	1146
40.2	Sustitución de materiales en los productos	1152
40.3	Sustitución de procesos en los productos	1156
40.4	Selección del proceso al fabricar una parte sencilla y simétrica con respecto a su eje	1157

ahora hay una amplia disponibilidad de bases de datos y sistemas expertos que facilitan el proceso de selección. Más aún, al revisar los materiales utilizados en los productos existentes, muy pronto resulta evidente que hay numerosas oportunidades para aplicar la *sustitución de materiales* con el fin de mejorar el desempeño y, en especial, ahorrar en el costo.

En la fase de producción de un artículo deben evaluarse adecuadamente las *capacidades de los procesos de manufactura* para elegir un proceso o una secuencia de procesos apropiados. Como se dijo en varios capítulos, por lo general hay más de un método de manufacturar los componentes individuales de un producto.

También son cada vez más importantes la evaluación del *ciclo de vida* y la *ingeniería del ciclo de vida* de productos, servicios y sistemas, en particular con respecto a su impacto potencialmente perjudicial en el ambiente. Ahora se pone más énfasis en la *manufactura sustentable* con el propósito de reducir o eliminar cualesquiera efectos adversos de la manufactura sobre el ambiente, a la vez que se permita a las compañías seguir siendo rentables.

Aunque en todo el libro se ha descrito la *economía* de los procesos individuales de manufactura, este capítulo adopta un punto de vista más amplio y resume los factores conjuntos del costo de la manufactura. También presenta métodos de reducción de costos, entre ellos el *análisis de valor*, herramienta poderosa para evaluar el costo de cada etapa de la fabricación con relación a su aporte al valor de un producto.

40.2 Diseño del producto

En todo el texto se han resaltado el *diseño para la manufactura y el ensamble* (DFMA, por sus siglas en inglés) y los aspectos competitivos de la manufactura. En las referencias enunciadas en la tabla 40.1 se dan varios lineamientos para seleccionar los materiales y procesos de manufactura. Continuamente se hacen avances importantes en el diseño para la manufactura y el ensamble, para los cuales hoy existen varios paquetes de software. Aunque su uso requiere una capacitación considerable, dichos avances ayudan mucho a los diseñadores en el desarrollo de productos de alta calidad con menos componentes, lo que disminuye el tiempo de producción y ensamble, así como el costo del producto.

40.2.1 Consideraciones sobre el diseño del producto

Además de los lineamientos sobre el diseño con respecto a los procesos individuales de manufactura, hay consideraciones generales sobre el diseño del producto (vea también *diseño robusto*, sección 36.5.1). Es frecuente que los diseñadores comprueben y verifiquen si han tomado en cuenta consideraciones como las siguientes:

1. ¿Se han investigado por completo todos los diseños alternativos?
2. ¿El diseño puede simplificarse y minimizarse el número de componentes sin perjudicar las funciones y el desempeño que se buscan?
3. ¿El diseño puede ser más pequeño y ligero?
4. ¿Hay en el producto características innecesarias y, si así fuera, pueden eliminarse o combinarse con otras?
5. ¿Se han tomado en cuenta los conceptos de diseño modular y bloques constituyentes (vea, por ejemplo, la sección 25.2.4), para una familia de productos semejantes y para su servicio, reparación y actualización?
6. Las tolerancias dimensionales y el acabado de la superficie, ¿son innecesariamente estrictas, con lo que aumenta de manera significativa el costo del producto y, si así fuera, se pueden relajar sin que haya efectos perjudiciales significativos?
7. ¿El producto será excesivamente difícil de ensamblar o desensamblar, o hacerlo requerirá mucho tiempo para darle mantenimiento, servicio o reciclar algunos o todos sus componentes?

TABLA 40.1**Referencias a varios temas en este libro (los números de página están entre paréntesis)****Propiedades del material**

Tablas 2.1 (56), 2.2 (58) y 2.3 (61), y figuras 2.5, 2.6, 2.7, 2.15, 2.16 y 2.17
 Tablas 3.1 (89) y 3.2 (90), y figuras 3.1, 3.2 y 3.3
 Tablas 5.3 (138), 5.4 (139) y 5.6 (143)
 Tablas 6.3 a 6.10 (152–160)
 Tablas 7.1 (170) y 7.2 (178)
 Tablas 8.1 (197), 8.2 (201) y 8.3 (205), y figura 8.3
 Tablas 9.1 (217), 9.2 (218) y 9.4 (228), y figuras 9.3, 9.5 y 9.7
 Tabla 10.1 (249)

Características de manufactura de los materiales

Tabla I.3 (14)
 Tabla 4.1 (120)
 Tabla 5.8 (145)
 Tabla 6.2 (151)
 Tablas 12.1 (297) y 12.6 (308)

Tolerancias dimensionales y acabado de la superficie

Tabla 11.2 (259)
 Tabla 23.1 (627) y figuras 23.14 y 23.15
 Figura 25.16

Capacidades de los procesos de manufactura

Tablas 11.1 (257) y 11.2 (259)
 Tabla III.1 (314)
 Tablas 14.1 (339) y 14.4 (356)
 Tabla 16.1 (388)
 Sección 17.7 y figura 17.15
 Tabla 18.1 (476)
 Tablas 19.1 (495) y 19.2 (530)
 Tabla 20.1 (538)
 Tablas 23.1 (627), 23.7 (638), 23.9 (646) y 23.11 (653)
 Tablas 26.3 (746) y 26.4 (747)

Consideraciones de diseño en el procesamiento

Procesos abrasivos: sección 26.5
 Maquinado avanzado: varias secciones en el capítulo 27
 Fundición: sección 12.2
 Moldeo de cerámicos: sección 18.5
 Extrusión: sección 15.7
 Forjado: sección 14.6

Costos y economía

Tablas I.5 (29), I.6 (31), I.7 (32) y sección I.10
 Tabla 6.1 (151)
 Sección 12.4
 Sección 14.9
 Sección 16.16
 Tabla 17.6 (469) y sección 17.7
 Tabla 19.2 (530) y sección 19.16
 Sección 25.8

Tabla 11.3 (280)
 Tablas 12.3 (305), 12.4 (306) y 12.5 (306), y figura 12.5
 Tablas 16.2 (398), 16.3 (403) y 16.4 (415), y figura 16.14
 Tablas 17.3 (464), 17.4 (465) y 17.5 (465), y figura 17.11
 Tabla 20.2 (539)
 Tablas 22.1 (602), 22.2 (603), 22.3 (603) y 22.5 (608), y figuras 22.1 y 22.9
 Tabla 26.1 (731)
 Tabla 32.3 (944)

Tabla 14.3 (349)
 Tabla 16.3 (403) y figura 16.34
 Tablas 17.1 (454) y 17.2 (462)
 Tablas 21.1 (568) y 21.2 (579)
 Figura 22.1 y tabla 40.2 (1149)

Figura 27.4
 Figuras 35.20 y 35.21
 Figura 40.4

Tabla 27.1 (771)
 Tablas 28.1 (810), 28.2 (819) y 28.3 (820), y figura 28.19
 Tablas 29.1 (857) y 29.3 (867)
 Tabla VI.1 (876)
 Tabla 30.1 (878)
 Tabla 32.4 (945)
 Tabla 37.2 (1064) y figura 37.3
 Tabla 39.1 (1128)
 Tablas 40.4 (1151) y 40.5 (1155), y figuras 40.2 y 40.3

Tratamiento térmico: sección 4.13
 Procesos de unión: varias secciones en los capítulos 30 a 32
 Maquinado: secciones en los capítulos 23 y 24
 Procesamiento de polímeros: sección 19.15
 Metalurgia de polvos: sección 17.6
 Formado de láminas metálicas: sección 16.15

Sección 26.9 y figura 26.37
 Sección 27.11
 Sección 31.8
 Sección 32.7
 Sección 37.11
 Sección 39.9
 Tabla 40.6 (1159) y sección 40.10

8. ¿Se minimiza el uso de sujetadores, su cantidad y variedad de tipos?
9. ¿Se han tomado en cuenta las consideraciones ambientales y se han incorporado al diseño del producto y selección del material y del proceso?
10. ¿Se han aplicado el diseño verde y los principios de la ingeniería del ciclo de vida, incluyendo consideraciones de reciclado de la cuna a la cuna?
11. ¿Se pueden subcontratar cualesquiera actividades de manufactura y algunas de las subcontratadas se pueden recuperar?

40.2.2 Diseño del producto y cantidad de materiales

Es posible lograr reducciones significativas en la *cantidad* de materiales requeridos por métodos como (a) reducir el tamaño del componente o su volumen o (b) usar materiales con mayores razones de resistencia a peso o de rigidez a peso (vea la figura 3.2). Lo último se puede lograr con la mejora y optimización del diseño del producto y la selección de diferentes secciones transversales, como las que tienen un momento de inercia elevado (por ejemplo, las vigas tipo I y canales) o empleando componentes tubulares o huecos en lugar de secciones sólidas.

Sin embargo, la implementación de cambios de diseño presenta dificultades significativas en la manufactura; por ejemplo, considere lo siguiente:

1. La fundición o moldeo de secciones transversales delgadas presenta dificultades en el llenado de dados y moldes y en el cumplimiento de la exactitud dimensional especificada y del acabado de la superficie (sección 12.2).
2. El forjado de secciones delgadas requiere fuerzas grandes y puede presentar dificultades (sección 14.3).
3. La extrusión por impacto de partes de paredes delgadas es difícil, en especial cuando se necesita una gran exactitud dimensional y simetría de la parte (sección 15.4.1).
4. La facilidad de formación de láminas metálicas se reduce conforme aumenta su espesor, lo que posiblemente conduzca al arrugamiento de la parte (sección 16.3).
5. El maquinado y rectificado de las piezas de trabajo delgadas provoca su distorsión, mala exactitud dimensional y vibración y traqueteo (sección 26.5); en consecuencia, tienen que considerarse procesos de maquinado avanzado (capítulo 27).
6. La soldadura de placas delgadas o estructuras esbeltas causa una distorsión importante de partes y estructuras (sección 30.10).

A la inversa, la manufactura de partes con secciones transversales gruesas tiene sus propios efectos perjudiciales:

1. La tasa de producción en la fundición de dados (sección 11.4.5) y el moldeo por inyección (sección 19.3) es más lenta debido al mayor ciclo de tiempo requerido para permitir el lapso suficiente con el fin de que se enfríen las regiones gruesas antes de retirar la parte del dado o molde.
2. En las regiones gruesas de los fundidos se desarrolla porosidad (figura 10.14).
3. En las piezas de fundición en dado, las secciones delgadas tendrán una resistencia menor por unidad de espesor, en comparación con las gruesas (sección 11.4.5).}
4. El procesamiento de partes de plástico requiere mayores ciclos de tiempo a medida que aumenta su espesor o volumen, debido al tiempo más largo que se requiere para que las partes se enfríen lo suficiente para retirarlas de sus moldes (capítulo 19).
5. La flexibilidad de las placas metálicas disminuye conforme se incrementa su espesor (sección 16.5).
6. En las partes hechas con metalurgia de polvos, hay variaciones significativas en la densidad, y por tanto en las propiedades de las regiones de espesor variable (sección 17.6).
7. La soldadura de secciones gruesas presenta dificultades en la calidad de las uniones soldadas (sección 30.9).

40.3 Calidad del producto

Recuerde que la *calidad* mundial (sección 36.2) es difícil de definir con precisión, sobre todo porque no sólo incluye características técnicas bien definidas sino también opiniones humanas, y por ello subjetivas. Sin embargo, por lo general se considera que un producto de alta calidad tiene al menos las características siguientes: (a) satisface las necesidades y expectativas del consumidor; (b) tiene alta confiabilidad y por tanto funciona bien durante su vida de servicio; (c) tiene aspecto agradable y (d) es fácil de instalar y mantener, por lo que las mejoras futuras son fáciles de lograr a bajo costo.

Una prioridad importante en la calidad del producto es el concepto de *mejora continua*, como lo ejemplifica el término japonés *kaizen* que significa *mejora sin fin* (sección 36.1). Recuerde también que el *nivel* de calidad que un fabricante elige para un producto en particular depende del mercado al que se dirige el producto. Los productos de baja calidad y baratos, como las herramientas de mano, tienen su propio nicho de mercado, del mismo modo que existe un mercado para productos de alta calidad y buenos acabados, como los automóviles Rolls-Royce, un reloj de oro incrustado de diamantes, máquinas herramienta e instrumentos de medición de alta precisión y equipo deportivo de alto rendimiento.

Rendimientos sobre la calidad. Al implementar calidad en los productos, es importante apreciar el concepto de *retorno por calidad* (ROQ, por sus siglas en inglés), con las siguientes consideraciones:

- La calidad debe verse como una inversión por su gran influencia en el largo plazo en la satisfacción del consumidor.
- Cualquier mejora de la calidad debe investigarse con respecto al costo adicional implícito.
- Debe haber cierto límite en la cantidad que un fabricante debe gastar para mejorar la calidad, en especial cuando ésta sea subjetiva.

Si bien resulta difícil evaluar la satisfacción de los clientes e incluirla en los cálculos de costo, cuando su satisfacción aumenta es más probable retenerlos y convertirlos en consumidores recurrentes; es improbable que esto ocurra si hay defectos significativos en los productos que compran. También es importante tener presente que los costos relativos involucrados con la identificación y reparación de los defectos en los productos crecen en varios órdenes de magnitud de acuerdo con la *regla de diez* que se presenta en la tabla I.5.

40.4 Evaluación del ciclo de vida y manufactura sustentable

La *evaluación del ciclo de vida* (LCA, por sus siglas en inglés) se define, de acuerdo con el estándar ISO 14000, como “un conjunto sistemático de procedimientos para compilar y examinar las entradas y salidas de materiales y energía y los efectos ambientales asociados o las cargas atribuibles directamente al funcionamiento de un producto, proceso o sistema de servicios, a través de todo su ciclo de vida”. El *ciclo de vida* comprende etapas consecutivas e interrelacionadas de un producto o servicio, desde el principio de su diseño y manufactura hasta su reciclado o eliminación; incluye:

1. Extracción de materia prima.
2. Procesamiento de materiales en bruto.
3. Manufactura de productos.
4. Transporte y distribución del producto al cliente.



Código QR 40.1 El continuo de la sustentabilidad (*Fuente:* Cortesía de Metal Powder Industries Federation).

5. Uso, mantenimiento y reutilización del producto.
6. Recuperación, reciclado y reutilización de los componentes del producto o su eliminación, que también incluye la de los fluidos del trabajo de metales, solventes de limpieza y varios líquidos usados en los procesos de tratamientos térmicos y cromado.

Un producto tiene por lo general varios componentes hechos a partir de una diversidad de materiales metálicos y no metálicos, procesados en partes individuales y después ensamblados. Así, cada componente tiene su propio ciclo de vida, como las llantas de un automóvil, el hule de los empaques en los grifos, focos en equipos luminosos y sellos en las aspiradoras. Además, (a) ciertos productos, en particular los hechos de papel, cartón, vidrio o plásticos baratos, son elaborados intencionalmente para que sean *desechables*, no obstante ahora son reciclables, y (b) otros muchos productos son del todo reutilizables.

Ingeniería del ciclo de vida. El objetivo principal de la *ingeniería del ciclo de vida* (LCE, por sus siglas en inglés), también llamada **diseño verde** o **ingeniería verde**, es considerar la *reutilización* y el *reciclado* de los componentes de un producto, comenzando en la etapa más temprana del diseño de un producto (vea la figura I.2). Aunque el análisis e ingeniería del ciclo de vida son herramientas exhaustivas y poderosas, su implementación es difícil, lenta y costosa, sobre todo por las incertidumbres con respecto a (a) la disponibilidad de los materiales, procesos y efectos en el largo plazo; (b) los datos de entrada y (c) el tiempo requerido para obtener datos confiables, con el fin de evaluar en forma apropiada las relaciones con frecuencia complejas entre los numerosos componentes de todo el sistema. Está en desarrollo software para agilizar estos análisis, en especial para las industrias química y manufacturera debido a su mayor potencial para tener efectos ambientales y ecológicos; ejemplos de dicho software incluyen FeaturePlan y Teamcenter, que corren en el ambiente ProEngineer.

De principio a fin. Los términos y conceptos del diseño *de la cuna a la cuna* (acuñado por W. R. Stahel en la década de 1970, y también llamado CRC o *diseño regenerativo*) y *de la cuna a la tumba* (que termina con la fase de eliminación de los productos) se describen en la sección I.4. Básicamente se trata de un modelo holístico para la actividad humana orientado a la vida y al bienestar de las generaciones futuras (vea también McDonough y Braungart en la bibliografía presentada al final de este capítulo).

Manufactura sustentable. Como es bien sabido, los recursos naturales del planeta Tierra son limitados, por lo que es necesaria la conservación tanto de materiales como de energía. El concepto de *manufactura sustentable* hace énfasis en la necesidad de conservar los recursos, en particular a través del mantenimiento y la reutilización adecuados. La manufactura sustentable significa cumplir con los propósitos principales de (a) incrementar el ciclo de vida de los productos; (b) eliminar los daños al ambiente y los ecosistemas y (c) asegurar nuestro bienestar colectivo.

EJEMPLO 40.1 Manufactura sustentable de los zapatos deportivos Nike

Entre numerosos ejemplos, la producción del calzado Nike ilustra los beneficios de la manufactura sustentable. Los zapatos de atletismo se ensamblan utilizando adhesivos (sección 32.4). Hasta cerca de 1990, los adhesivos que se usaban contenían solventes a base de petróleo, lo cual constituía un riesgo para la salud de los seres humanos y contribuía a la formación de smog petroquímico. La compañía cooperó con los proveedores de productos químicos para de-

sarrollar con éxito tecnología de adhesivos basada en agua, que hoy se utiliza en la mayoría de las operaciones de ensamble del calzado. Como resultado, el uso de solventes en todos los procesos de manufactura en las instalaciones subcontratadas por Nike en Asia se ha reducido en gran parte.

Las suelas de hule del calzado deportivo están hechas con un proceso que da como resultado cantidades significativas de hule adicional alrededor de la suela,

llamadas *rebaba* (similares a la rebaba que se muestra en las figuras 14.6d y 19.17). Con alrededor de 40 fábricas que usan miles de moldes y producen más de un millón de suelas por día, la rebaba constituye el desperdicio más grande en la manufactura de estos artículos.

Con el fin de reducir este desperdicio tan grande, la empresa desarrolló una tecnología que procesa la reba-

ba hasta obtener un polvo de hule de $500\ \mu\text{m}$, el cual se agrega de nuevo a la mezcla de hule para las suelas; con este método se redujo el desperdicio en 40%. Además, se descubrió que el hule mezclado tenía mejor resistencia a la abrasión y durabilidad y su desempeño general era más alto que el mejor de los hules.

40.5 Consumo de energía durante la manufactura

El sector de la manufactura consume aproximadamente la cuarta parte de la producción mundial anual de energía; este número ha disminuido desde su máximo de 50%, en la década de 1970, gracias a los grandes esfuerzos por reducir el desperdicio y mejorar la eficiencia de la maquinaria y las operaciones de manufactura. La fuente más común de energía es, por mucho, la electricidad producida a partir de petróleo, gas natural, biocombustibles, carbón, plantas nucleares, viento, el Sol y oleaje. Dado el gran porcentaje y la variedad de sus fuentes, deben considerarse y resolverse todas las preocupaciones acerca de la disponibilidad y conservación de la energía para la manufactura. En realidad no es probable que se desarrollen e implementen políticas nacionales viables sin una consideración central del sector manufacturero.

Demanda de energía en el proceso. La energía requerida para producir una parte o componente particular está determinada en gran medida por su diseño, material y la operación de manufactura, así como por la calidad, condición y edad de la maquinaria y el equipo. Es relativamente fácil calcular el requerimiento de energía de un proceso de manufactura (vea, por ejemplo, la tabla 21.2), pero se hace difícil cuando se incluye equipo secundario en el cálculo final. Por ejemplo, en las operaciones de manufactura están involucrados bombas, ventiladores, fuelles, hornos e iluminación. Además, la eficiencia de la operación varía por lo general en función de las prácticas y procedimientos de una planta en particular, o de una compañía a otra. Por ejemplo:

- Algunas operaciones de manufactura son más demandantes de energía que otras, como se muestra en la figura 40.1.
- Cada proceso de manufactura tiene un rango de desempeño; las tasas de procesamiento varían mucho en función, por ejemplo, de las tolerancias especificadas y del acabado superficial establecido porque las tolerancias estrictas y las superficies lisas consumen el máximo tiempo y son intensivas en el uso de energía (figuras 40.2 y 40.3).
- Los requerimientos de energía de ciertos procesos están muy relacionados con la secuencia de

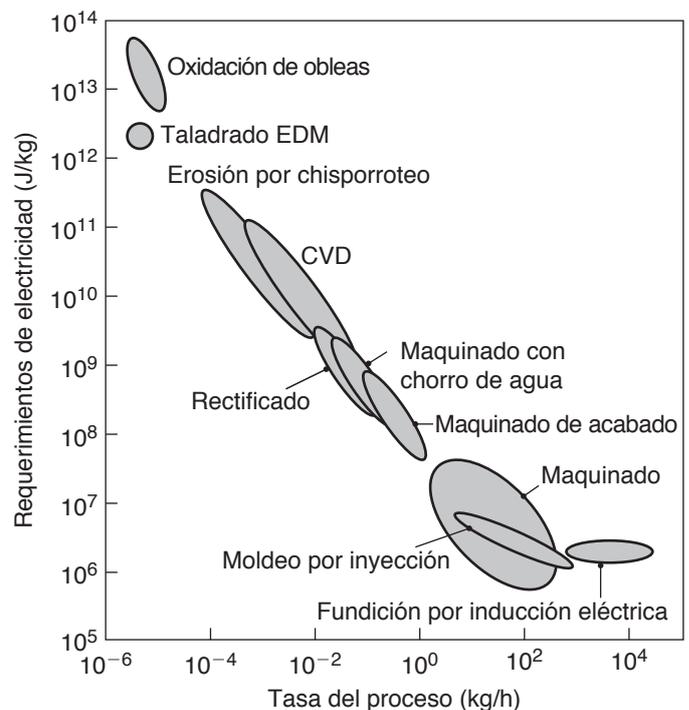


FIGURA 40.1 Requerimientos específicos de energía de varios procesos de manufactura que incluyen equipos auxiliares. Fuente: Basado en S. Gutowski.

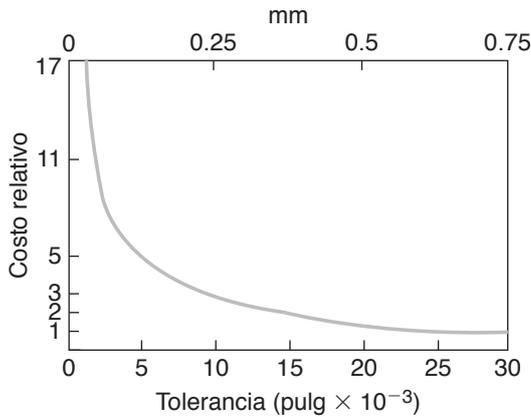


FIGURA 40.2 Dependencia del costo de manufactura de la tolerancia dimensional.

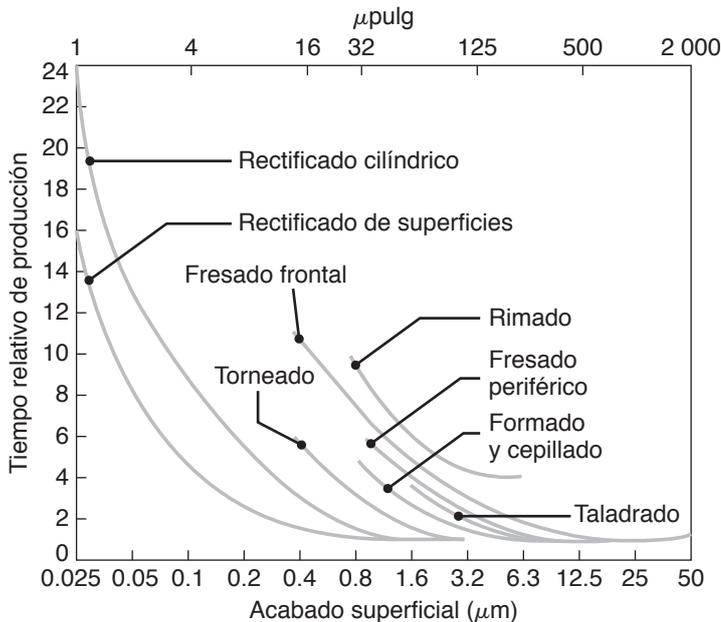


FIGURA 40.3 Tiempo relativo de producción como función del acabado de la superficie producida con distintos procesos de manufactura (vea también la figura 26.35).

operaciones realizadas, como cuando, por ejemplo, una máquina está lista pero todavía no procesa activamente el material; por tanto (a) en el moldeo por inyección (sección 19.3), el molde ya se instaló en la máquina pero todavía no se llena con el polímero, o (b) cuando una pieza de trabajo se reposiciona en un sujetador en un centro de maquinado (sección 25.2).

- Algunas máquinas tienen bombas hidráulicas de operación continua, mientras que otras las apagan durante los periodos de inactividad.
- En las operaciones de trabajo en caliente, las piezas de trabajo pueden enfriarse lanzando aire fresco sobre ellas y con frecuencia, en la práctica, el aire caliente se descarga hacia la atmósfera. Sin embargo, el aire caliente que se genera puede usarse para precalentar el material almacenado para su procesamiento, calentar las instalaciones o proveer de agua caliente.

Efecto de los materiales. Ya sea que un material se extraiga de una mina, refine y funda; se sintetice a partir de procesos químicos o se recicle a partir de productos de desecho, se requiere energía para producir materiales en formas que puedan procesarse. En muchas aplicaciones se observa que ciertos materiales tienen una ventaja de desempeño sobre otros. Por ejemplo, en la aviación se prefieren con mucho las aleaciones de titanio y aluminio que el acero, sobre todo debido a sus bajas razones de resistencia a peso y rigidez a peso (vea la figura 3.2), lo que permite diseños más ligeros y los ahorros en combustible asociados.

Sin embargo, es importante observar que materiales diferentes tienen requerimientos muy distintos de energía, y los materiales reciclados tienen necesidades significativamente menores de energía. La tabla 40.2 resume la energía requerida para producir varios materiales y presenta los datos por masa y volumen. Se ha observado que si la energía o *huella de carbono* se divide entre la masa, hay un beneficio natural en usar materiales más pesados, lo que podría no justificarse en problemas con restricciones de peso. Por otro lado, si el volumen es una restricción, entonces la energía por unidad de peso es una medida justa.

Observe en la tabla 40.2 que la producción de los metales requiere cantidades importantes de energía; por lo general se reducen o extraen a partir

de sus óxidos, un proceso que consume mucha energía. Se ha estimado que 5% del consumo total de energía en Estados Unidos se emplea en la producción de aluminio (sección 6.2). No es raro que la energía necesaria para producir un material sea de tres a cuatro órdenes de magnitud mayor que la requerida para darle su forma final. Por tanto, es comprensible que el uso de aluminio en los automóviles sea difícil de justificar sin la implementación permanente del reciclado.

40.6 Selección del material para los productos

En la *selección de los materiales* para elaborar un producto, es esencial entender bien los *requerimientos funcionales* de cada uno de sus componentes individuales. Los criterios generales para seleccionar los materiales se describen en la sección I.5 de la introducción general; esta sección los estudia con más detalles específicos.

Propiedades generales de los materiales. Las *propiedades mecánicas* (capítulo 2) incluyen resistencia, tenacidad, ductilidad, rigidez, dureza y resistencia a la fatiga, al agrietamiento y al impacto. Las *propiedades físicas* (capítulo 3) incluyen densidad, punto de fusión, calor específico, conductividad térmica y eléctrica, expansión térmica y propiedades magnéticas. Las *propiedades químicas* de interés principal en la manufactura son su susceptibilidad a la oxidación y corrosión y su respuesta a varios procesos de tratamiento de la superficie (capítulo 34). El costo de la corrosión, aunque muy oculto, se estima ser del orden de 3% del producto interno bruto de Estados Unidos.

La selección del material se ha vuelto más fácil y rápida por la creciente disponibilidad de grandes bases de datos computarizadas que brindan mayor acceso y exactitud. Se ha desarrollado **software de sistemas expertos** (llamado **bases de datos inteligentes**, sección 39.8) para facilitar la selección de materiales. Estos sistemas son capaces de identificar los materiales apropiados para una aplicación específica, exactamente como lo haría un experto o un equipo de expertos.

Formas de materiales disponibles en el comercio. Después de seleccionar los materiales apropiados, el paso siguiente es determinar las formas y tamaños en existencia en el *comercio* (tabla 40.3). En función del tipo, los materiales por lo general se encuentran disponibles como fundidos, extrusiones, forjas, barras y cables, barras roladas, placas, láminas, películas y metales en polvo.

La compra de materiales en las formas que requieran la mínima cantidad de procesamiento adicional es, obviamente, una consideración económica importante; también son relevantes características como el acabado superficial, tolerancias dimensionales, rectitud y rugosidad (vea, por ejemplo, las figuras 23.14, 23.15, 27.4 y la tabla 11.2). Es obvio que cuanto mejores y más consistentes sean dichas características, menos procesamiento adicional se requerirá. Si, por ejemplo, se desean ejes sencillos cilíndricos con buena exactitud dimensional, redondos, rectos y con buen acabado superficial, entonces podrían adquirirse barras cilíndricas que primero se hayan torneado (o trefilado) y rectificado sin centros (figura 26.23) a las dimensiones especificadas.

A menos que las instalaciones de una planta tengan la capacidad de producir barras cilíndricas en forma económica, por lo general es menos caro comprarlas. Si se requiere un eje escalonado (que tenga diferentes diámetros a lo largo de su longitud, como se ilustra en la figura IV.3), puede comprarse una barra que tenga un diámetro que sea al menos igual al diámetro mayor del eje escalonado, después se torneraría o procesaría y se le daría forma por otros medios hasta reducir su diámetro.

TABLA 40.2

Contenido de energía de los materiales seleccionados

Material	Contenido de energía	
	MJ/kg	GJ/m ³
Metales		
Aluminio		
De bauxita	300	810
Reciclado	42.5	115
Hierro fundido	30-60	230-460
Cobre		
De la mena	105	942
Reciclado	55.4	497
Plomo	30	330
Magnesio	410	736
Aceero		
De la mena	55	429
Reciclado	9.8	76.4
Zinc	70	380
Polímeros		
Nailon 6,6	175	200
Polietileno		
Alta densidad	105-120	100-115
Baja densidad	80-100	75-95
Poliestireno	95-140	95-150
Cloruro de polivinilo	67-90	90-150
Cerámicos	1-50	4-100
Vidrios	10-25	30-60
Madera	1.8-4.0	1.2-3.6

TABLA 40.3

Formas de materiales disponibles en el comercio

Material	Disponible como
Aluminio	B, F, I, P, S, T, W
Cerámicos	B, p, s, T
Cobre y latón	B, f, I, P, s, T, W
Elastómeros	b, P, T
Vidrio	B, P, s, T, W
Grafito	B, P, s, T, W
Magnesio	B, I, P, S, T, w
Plásticos	B, f, P, T, w
Metales preciosos	B, F, I, P, t, W
Aceros y aceros inoxidable	B, I, P, S, T, W
Zinc	F, I, P, W

Nota: B = barras redondas y otras secciones; F = película; I = lingotes; P = placa y lámina; S = formas estructurales; T = tubos y W = alambre o alambón; generalmente todos los metales existen como polvos. Las letras minúsculas indican disponibilidad limitada.

Cada operación de manufactura produce piezas específicas en cuanto a su forma, acabado superficial y exactitud dimensional; considere los ejemplos siguientes:

- Los fundidos por lo general tienen menor exactitud dimensional y un acabado superficial menos bueno que otras partes elaboradas por forjado en frío, extrusión en frío o metalurgia de polvos.
- Los productos laminados en caliente o trefilados en caliente por lo general tienen un acabado superficial más rugoso y con tolerancias dimensionales mayores que los laminados o trefilados en frío.
- Las extrusiones tienen tolerancias más pequeñas que las partes fabricadas por laminado de placas metálicas.
- Las barras cilíndricas maquinadas en un torno tienen un acabado superficial más rugoso que las barras similares trefiladas.
- El espesor de pared de los tubos soldados por lo general es más uniforme que el de los que no tienen costura.

Características de la manufactura de materiales. Las *características de la manufactura* de los materiales incluyen la facilidad de fundición, de ser trabajados, formados, maquinados, soldados y endurecidos por tratamiento térmico. También recuerde que la calidad de la materia prima (almacenada) influye mucho en sus propiedades de manufactura. Los siguientes son ejemplos comunes:

- Una barra con costura o doblez longitudinal desarrollará grietas incluso durante las operaciones sencillas de acomodo o posicionamiento.
- Los cilindros con defectos internos, como inclusiones duras, se agrietarán durante el procesamiento posterior.
- Los fundidos porosos desarrollarán un mal acabado superficial cuando se maquina posteriormente para obtener una mejor exactitud dimensional.
- Las partes que se tratan térmicamente de manera no uniforme, o las barras trefiladas en frío que no se liberan de esfuerzos de modo adecuado, se distorsionarán durante el procesamiento subsecuente.
- El material nuevo que tenga variaciones significativas en su composición y microestructura no puede ser tratado térmicamente o maquinado en forma consistente y uniforme.
- Las placas metálicas que tengan variaciones en las condiciones en que se trabajaron en frío mostrarán diferentes grados de restitución durante su flexión y otras operaciones de formado posterior.
- Si se proveen materiales de lámina metálica previamente lubricados con espesor y distribución no uniforme del lubricante, se verán perjudicados su facilidad de moldeo, acabado superficial y calidad general en las operaciones de estampado subsecuentes.

Confiabilidad de los suministros de material. Son varios los factores que influyen en la *confiabilidad de los suministros de material*: déficit de materiales, huelgas, geopolítica y la renuencia de los proveedores a producir materiales con una forma o calidad particulares. Además, aun cuando las materias primas estén generalmente disponibles en un país, podrían no estar en existencia en la ubicación particular de una planta.

Consideraciones de reciclado. El *reciclado* es relativamente sencillo para productos como metales de desecho, botellas de plástico y latas de aluminio; sin embargo, es frecuente que los componentes individuales de un producto deban desarmarse y reunirse en grupos. Es obvio que si tiene que dedicarse mucho tiempo y esfuerzo para hacer esto, el reciclado se hará prohibitivamente caro. Algunos lineamientos generales para facilitar el reciclado son los siguientes:

- Reducir el número de partes y tipos de materiales en los productos.
- Reducir la variedad de los modelos de los productos.
- Usar un diseño modular para facilitar el desensamble del producto.



Código QR 40.2 Estudios de caso de ingeniería verde. (Fuente: Cortesía de Intel Corp.).

- Para productos hechos de plástico, usar lo más posible un tipo único de polímero.
- Marcar las partes de plástico para una identificación más fácil.
- Evitar el uso de recubrimientos, pinturas y cromados; en vez de ello utilizar en las partes de plástico colores moldeados en la parte.
- Evitar el empleo de adhesivos, remaches y otros métodos permanentes de unión y ensamble; en vez de ello usar sujetadores, en especial de presión.

Como ejemplo de un método de reciclado, un fabricante de impresoras láser redujo en 32% el número de partes de un cartucho y en 55% la variedad de materiales plásticos utilizados.

Costo de materiales y procesamiento. Debido a su historia de procesamiento, el *costo unitario* de una materia prima (generalmente por peso unitario) depende no sólo del material en sí, sino también de su forma, tamaño y condición. También, por ejemplo: (a) por estar involucradas más operaciones en la producción de cable delgado que en la de una barra cilíndrica, su costo unitario es mucho mayor; (b) los metales en polvo por lo general son más caros que sus menas, y (c) el costo de los materiales en general decrece conforme se incrementa la cantidad que se compra, en especial para las compañías automotrices que adquieren materiales en cantidades muy grandes.

El costo de un material en particular está sujeto a fluctuaciones causadas por factores tan sencillos como la oferta y la demanda, o tan complejos como la geopolítica. Si un material usado en un producto ya no tiene un costo competitivo, habrá que seleccionar materiales alternativos, como (a) en la carestía de cobre de la década de 1940 el gobierno de Estados Unidos tuvo que acuñar monedas de un centavo hechas de acero y zinc plateado (vea la tabla I.2), y (b) cuando el precio del cobre se incrementó en forma sustancial durante la década de 1960, el cableado eléctrico en las viviendas pasó a ser de aluminio; sin embargo, esta sustitución llevó al rediseño de las terminales de los interruptores y contactos eléctricos con objeto de evitar el calentamiento excesivo en esos puntos, ya que el aluminio tiene mayor resistencia que el cobre en el contacto de las uniones.

Desperdicios. El valor del *desperdicio* (tabla 40.4) se deduce del costo del material con el fin de obtener el costo neto de éste. Su valor depende del tipo de material y de la demanda, y por lo general es de 10 a 40% del costo original del material. Observe que en el maquinado el desperdicio es muy alto, mientras que procesos como el rolado, rolado de anillos y metalurgia de polvos producen un mínimo de desperdicio, de ahí que se llamen procesos de forma casi final (o casi neta).

40.7 Sustitución de materiales

La *sustitución de materiales* juega un rol principal en la economía de la manufactura de productos. La manufactura de automóviles y aviones son ejemplos comunes de industrias grandes en las que la sustitución de materiales es una actividad habitual; una tendencia semejante se evidencia en los artículos deportivos y en otros productos más. Hay varias razones para sustituir materiales en los productos:

1. Reducir los costos de los materiales y su procesamiento.
2. Mejorar la eficiencia de las operaciones de manufactura y ensamble.
3. Mejorar el desempeño del producto, como ocurre con la reducción de su peso y la mejora de su resistencia a desgaste, fatiga y corrosión.
4. Incrementar las razones de rigidez a peso y de resistencia a peso.
5. Reducir la necesidad de mantenimiento y reparaciones periódicas.
6. Disminuir la vulnerabilidad ante la falta de confiabilidad del suministro de materiales.

TABLA 40.4

Desperdicios aproximados producidos en diversas operaciones de manufactura	
Proceso	Desperdicios (%)
Maquinado	10-80
Forjado en caliente	20-25
Formado de lámina metálica	10-25
Extrusión en caliente	15
Fundición en molde permanente	10
Metalurgia de polvos	<5
Laminado	<1

7. Mejorar el cumplimiento de las leyes y regulaciones que prohíben el empleo de ciertos materiales, en especial por razones de salud.
8. Mejorar la robustez para reducir las variaciones de desempeño o sensibilidad ambiental del producto.
9. Mejorar la facilidad del reciclado.

Sustitución de materiales en la industria automotriz

- Ciertos componentes de la carrocería se reemplazan con partes de plástico o plástico reforzado.
- Defensas, engranes, bombas, tanques de combustible, carcasas, cubiertas, abrazaderas y otros componentes se sustituyen con plásticos o materiales compósitos.
- Las bases del chasis de acero al carbono se reemplazan con aceros TRIP o TWIP.
- Componentes de acero estructural se cambian por aleaciones de aluminio.
- Partes metálicas del motor son sustituidas por partes de cerámicos y materiales compósitos.
- La columna metálica de la dirección es reemplazada por otra de material compósito.
- Los monoblocks de hierro fundido del motor se cambian a fundidos de aluminio, los cigüeñales forjados pasan a ser fundidos y las bielas forjadas se hacen fundidas por metalurgia de polvos o de materiales compósitos.

Sustitución de materiales en las industrias aeronáutica y aeroespacial

- Las aleaciones de aluminio convencional (en particular las series 2000 y 7000) son reemplazadas con aleaciones de aluminio-litio, titanio, compósitos de polímero reforzado y aluminio reforzado con vidrio, debido a las mayores razones de resistencia a peso de estos materiales.
- Las partes forjadas son sustituidas con otras obtenidas por metalurgia de polvos que se manufacturan con un mejor control de las impurezas y la microestructura; las partes por metalurgia de polvos también requieren menos maquinado y producen menor desperdicio de materiales caros.
- Materiales compósitos avanzados y estructuras de panal reemplazan a componentes estructurales de aluminio tradicional, y compósitos de matriz metálica sustituyen ciertas partes estructurales de aluminio y titanio.

EJEMPLO 40.2 Sustitución de materiales en los productos

En la siguiente lista los productos comunes se pueden elaborar a partir de algún conjunto de los materiales mencionados:

1. Bate de béisbol: metal *versus* madera.
2. Martillo: metal *versus* plástico reforzado o mango de madera.
3. Múltiple de entrada del motor: metal *versus* plástico.
4. Silla de jardín: hierro fundido *versus* aluminio.
5. Placa de interruptor eléctrico: plástico *versus* placa metálica.
6. Fuselaje de avión: aluminio *versus* materiales compósitos.
7. Birlos de neumáticos: zinc *versus* cobre.

Lo que sigue son ejemplos más recientes de posibles sustituciones de materiales, algunas de las cuales ya se han llevado a cabo y otras se encuentran en diferentes etapas de avance:

8. Ventanas de automóviles: vidrio *versus* policarbonato.
9. Puente peatonal: acero *versus* titanio.
10. Bicicleta: metal *versus* madera endurecida.
11. Carrocerías automotrices: acero *versus* aluminio.
12. Carrocerías de camiones: acero *versus* acero inoxidable.
13. Guitarra: madera *versus* plástico o aluminio.
14. Placa de armadura: aluminio *versus* acero u otras aleaciones de alta resistencia.
15. Conexiones en paquetes IC: cobre *versus* oro.

40.8 Capacidades del proceso de manufactura

La *capacidad del proceso* es la posibilidad de un proceso particular de manufactura de producir, en condiciones controladas de producción, partes sin defectos dentro de ciertos límites de precisión (vea también la sección 36.8.2). En la figura 40.4 se presentan las capacidades de varios procesos de manufactura. Observe, por ejemplo, que la fundición en arena no puede producir partes delgadas, mientras que el laminado en frío es capaz de generar materiales muy delgados, como lo evidencia un producto tan común como el papel aluminio.

Igualmente importantes son las capacidades de varios procesos para cumplir tolerancias dimensionales y requerimientos dimensionales muy estrictos, como se ilustra en las figuras 23.14 y 40.4. Observe, por ejemplo, que la fundición en arena produce superficies mucho más rugosas que el pulido. La importancia del control del proceso puede apreciarse al analizar los rangos alcanzables en la figura. Por ejemplo, observe en la figura 23.14 la gran envolvente para las operaciones de maquinado y acabado, con límites de rugosidad que, por diferentes razones, abarcan tres órdenes de magnitud. Así, si una operación de torneado se ejecuta en un torno con mantenimiento deficiente o con herramientas y parámetros de procesamiento inapropiados, entonces las tolerancias y el acabado superficial serán, por supuesto, deficientes.

Tolerancias dimensionales y acabado superficial. Las *tolerancias dimensionales* y el *acabado superficial* producido tienen importancia particular en (a) las operaciones subsiguientes de ensamble, debido a las posibles dificultades al ajustar las partes durante el ensamble, y (b) la operación apropiada de las máquinas e instrumentos, ya que su desempeño afectará tolerancias y acabado.

Es posible lograr tolerancias más estrechas y mejor acabado de la superficie por medio de operaciones posteriores de acabado (vea la sección 26.7), pero con un costo mayor. Cuanto más fino sea el acabado que se especifique para la superficie, más largo será el tiempo de manufactura. Por ejemplo, se ha observado que al maquinar miembros estruc-

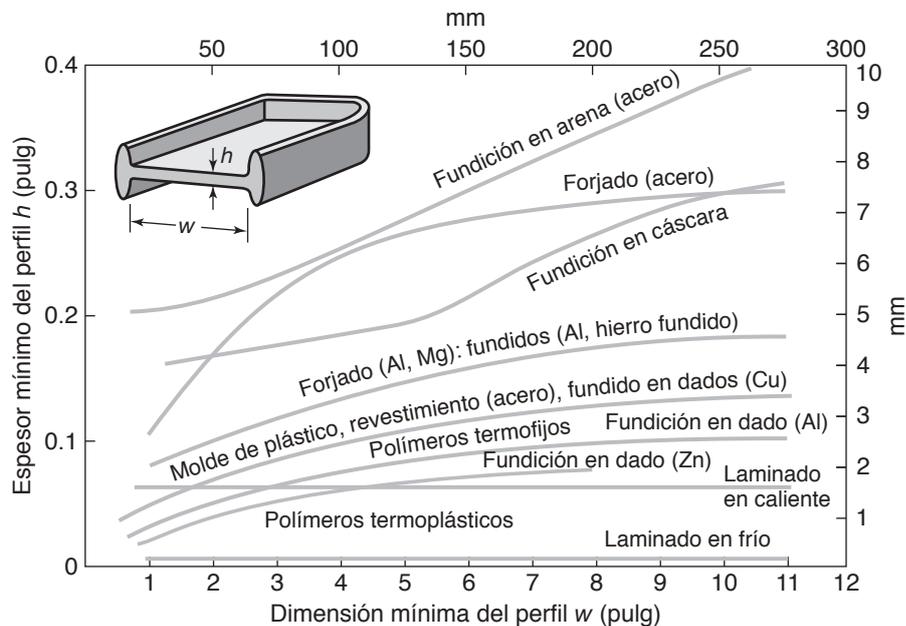


FIGURA 40.4 Capacidades del proceso de manufactura para dimensiones mínimas de partes. Fuente: Basado en J. A. Schey.

turales aeronáuticos hechos de titanio, hasta 60% del costo del maquinado se concentra en el paso final. Por tanto, a menos que se requiera otra cosa, las partes deben especificarse con una superficie tan rugosa y una tolerancia dimensional tan amplia como lo hagan aceptable las funciones y la estética.

Cantidad de producción. Dependiendo del tipo de producto, la cantidad de producción, también conocida como *tamaño del lote*, varía mucho. Por ejemplo, los rodamientos, pernos y tuercas, contenedores de metal o plástico, llantas, automóviles y podadoras se producen en grandes cantidades, mientras que los motores de jet, motores diesel, locomotoras y equipo médico se producen en cantidades mucho más limitadas. La cantidad de producción también juega un papel significativo en la selección del proceso y equipo. En realidad, hay toda una disciplina de la manufactura llamada **cantidad económica de pedido** dedicada a determinar matemáticamente la cantidad óptima de producción.

Tasa de producción. Un factor importante en la selección del proceso de manufactura es la *tasa de producción*, definida como el número de piezas por fabricar por unidad de tiempo (hora, día o año). Es obvio que la tasa se incrementa con el uso de equipo múltiple y maquinaria muy automatizada. La fundición con moldes, metalurgia de polvos, impresión profunda, trefilado y laminado son operaciones de una gran tasa de producción; en contraste, la fundición en arena, el maquinado electroquímico, formado de superplásticos, unión adhesiva y por difusión y el procesamiento de plásticos reforzados son operaciones relativamente lentas.

Tiempo del ciclo. El *tiempo del ciclo* por lo general se define como el lapso que transcurre entre la recepción del pedido de cierto producto y su entrega al consumidor. En función del tamaño, material y forma de la parte, y de la precisión de los dados requeridos, el tiempo del ciclo para procesos como forjado, extrusión, fundición con molde, laminado y formado de placas metálicas puede variar de semanas a meses. En contraste, procesos como el maquinado, rectificado y remoción avanzada de material tienen implícita una flexibilidad significativa debido al hecho de que utilizan maquinaria y herramientas que se adaptan con facilidad a la mayor parte de requerimientos de la producción. Recuerde que los centros de maquinado, células de manufactura flexible y sistemas de manufactura flexible son capaces de responder con rapidez y eficacia ante los cambios en el producto y las cantidades de producción (vea también *prototipado rápido* en el capítulo 20).

Robustez de los procesos y maquinaria de la manufactura. En la sección 36.5.1 se describió la *robustez* como lo que caracteriza un diseño, proceso o sistema que funciona dentro de parámetros aceptables a pesar de las variaciones en su ambiente. Para apreciar su importancia en los procesos de manufactura, considere una situación en la que un simple engrane de plástico se produce con moldeo por inyección: se ha observado que hay variaciones significativas e impredecibles en la calidad a medida que se producen los engranes. En la inyección por moldeo hay diversas variables y parámetros bien comprendidos que incluyen los efectos de la calidad de la materia prima, la velocidad de operación y las temperaturas dentro del sistema. Todas éstas son variables independientes, por lo que se pueden controlar.

Sin embargo hay otras variables, llamadas **ruido**, que están mucho más allá del control del operador, como (a) variaciones en la temperatura y humedad del ambiente de la planta durante el día; (b) polvo en el aire que entra a la planta por una puerta abierta, que tal vez contamine las charolas que alimentan las tolvas de la máquina de inyección de moldes; (c) variación en la temperatura del molde, lo que depende del retraso entre corridas sucesivas de moldeo y (d) variabilidad en el desempeño de los operadores individuales durante los distintos turnos. Con el fin de mantener una buena calidad del producto, es esencial entender los efectos, si los hubiera, de cada elemento del ruido en la operación,

por ejemplo: (a) ¿por qué y cómo afecta la temperatura del ambiente la calidad y características de la superficie de los engranes moldeados? (b) ¿Por qué y de qué manera el polvo que cubre una charola en la tolva de la máquina afecta su comportamiento en el moldeo? Como resultado, podrían establecerse ciertas medidas de control en el sistema.

40.9 Selección del proceso

La *selección del proceso* está íntimamente relacionada con las características de los materiales que se han de procesar, como se muestra en la tabla 40.5.

Características y propiedades de los materiales de la pieza de trabajo. Recuerde que ciertos materiales se pueden procesar a temperatura ambiente, en tanto que otros requieren temperaturas elevadas, por lo que se necesitan ciertos hornos, herramientas apropiadas y diversos controles. Algunos materiales son fáciles de procesar porque son suaves y dúctiles; otros son duros, quebradizos y abrasivos, por lo que se necesitan técnicas, herramientas y equipos apropiados para procesarlos.

TABLA 40.5

	Aceros al carbono	Aleaciones de acero	Aceros inoxidables	Aceros para herramientas y dados	Aleaciones de aluminio	Aleaciones de magnesio	Aleaciones de cobre	Aleaciones de níquel	Aleaciones de titanio	Aleaciones refractarias
Fundición										
Arena	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1
Yeso	3	3	3	3	1	1	1	3	3	—
Cerámico	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1
Revestimiento	1	1	1	3	1	2	1	1	1	1
Permanente	2	2	3	3	1	1	1	3	3	—
Dado (inyección)	3	3	3	3	1	1	1	3	3	—
Forjado										
Caliente	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Frío	1	1	1	3	1	2	1	3	3	—
Extrusión										
Caliente	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
Fría	1	2	1	3	1	3	1	2	3	3
Impacto	3	3	3	3	1	1	1	3	3	3
Laminado	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2
Metalurgia de polvos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Formado de lámina metálica	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1
Maquinado										
Químico	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2
ECM	3	1	2	1	3	3	2	1	1	1
EDM	3	2	2	1	3	3	2	2	2	1
Rectificado	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Soldado	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1

Nota: 1 = generalmente se procesa con este método; 2 = se puede procesar con este método; 3 = es inusual procesarlo con este método.

Como puede verse en la tabla 40.5, son pocos los materiales que tienen características favorables de manufactura en todas las categorías. Un material fácil de fundir o forjar, por ejemplo, puede plantear dificultades en el procesamiento posterior, como el maquinado, rectificado y pulido, que quizá se requiera para obtener un acabado superficial y exactitud dimensional aceptables.

Más aún, los materiales tienen diferentes respuestas a la tasa de deformación (vea *sensibilidad a la velocidad de deformación*, secciones 2.2.7 y 7.3) a que se sujetan. En consecuencia, la velocidad a que opera una máquina en particular afecta la calidad del producto, incluso el desarrollo de defectos externos e internos. Por ejemplo, la extrusión por impacto o el forjado por goteo tal vez no sean apropiados para cierto material con mucha sensibilidad a la velocidad de deformación, mientras que el mismo material tendrá buen desempeño en una prensa hidráulica o en la extrusión directa.

Características geométricas. Los requerimientos para la forma, el tamaño y espesor de la parte; las tolerancias dimensionales y el acabado superficial influyen en la selección de un proceso o procesos, como se describe en este y otros capítulos del libro.

Tasa y cantidad de producción. Estos requerimientos dictan la selección del proceso por medio de la productividad de un proceso, de la máquina o del sistema (vea la sección 40.7).

Consideraciones sobre la selección del proceso. Los factores principales involucrados en la selección del proceso se resumen como sigue:

1. ¿Están disponibles en el comercio como artículos estándar algunas o todas las partes o componentes que se necesitan en un producto?
2. ¿Cuáles componentes del producto tienen que manufacturarse en la planta?
3. ¿Se dispone en la planta de las herramientas que se requieren? Si no es así, ¿se pueden comprar como artículo estándar?
4. ¿Es posible implementar la tecnología de grupos para partes que tienen atributos geométricos y de manufactura parecidos?
5. ¿Se han investigado todos los procesos alternativos de manufactura?
6. ¿Son rentables los métodos seleccionados para el tipo de material, forma de la parte que se va a producir y la tasa de producción requerida?
7. ¿Se pueden cumplir de manera consistente los requerimientos de las tolerancias dimensionales, el acabado superficial y la calidad del producto, o es posible relajarlos?
8. ¿Se puede producir la parte con sus dimensiones finales y características de superficie sin que requiera un procesamiento adicional ni operaciones de acabado?
9. ¿Se han optimizado todos los parámetros de procesamiento?
10. ¿Se produce desperdicio y, de ser así, es mínimo? ¿Cuál es el valor del desperdicio?
11. ¿Se han explorado todas las posibilidades de automatización y control computarizado para todas las fases del ciclo total de manufactura?
12. ¿Se han implementado todas las técnicas automáticas de inspección en línea y control de calidad?

EJEMPLO 40.3 Sustitución de procesos en los productos

La siguiente lista ofrece algunas elecciones comunes que se hacen en la selección del proceso para los productos mencionados. Recuerde que cada par de procesos tiene sus propias ventajas y limitaciones en cuanto a consideraciones como peso, esperanza de vida, durabilidad y costo.

1. Cigüeñal: forjado *versus* fundido.
2. Biela: forjada *versus* metalurgia de polvos.
3. Cubierta: lámina metálica *versus* fundida.
4. Rin de automóvil: forjado *versus* fundido.
5. Engrane grande: maquinado *versus* formado de precisión.

6. Engrane recto: forjado *versus* metalurgia de polvos.
7. Sujetador roscado: laminado de rosca *versus* maquinado.
8. Sartén: fundido *versus* estampado.
9. Muebles exteriores: tubería de aluminio formado *versus* hierro fundido.
10. Estructuras de máquinas herramienta: soldadura *versus* sujeción mecánica.

EJEMPLO 40.4 Selección del proceso al fabricar una parte sencilla y simétrica con respecto a su eje

Dado: La parte sencilla que se muestra en la figura 40.5 se va a producir en grandes cantidades. Mide 12.5 mm (5 pulg) de longitud y sus diámetros grande y pequeño son, respectivamente, de 38 y 25 mm (1.5 y 1.0 pulg). Suponga que esta parte debe estar hecha de metal debido a requerimientos funcionales como resistencia, rigidez, dureza y resistencia al desgaste y a temperaturas elevadas.

Se solicita: Seleccionar un proceso de manufactura y describir cómo se organizarían las instalaciones de producción para fabricar un producto rentable y de alta calidad.

Respuesta: Recuerde que, en cuanto sea posible, las partes deben producirse hasta su forma neta, o casi neta (manufactura de forma casi neta), siguiendo un método que elimina gran parte del procesamiento secundario y con ello reduce el tiempo y costo total de la manufactura. Debido a que su forma es relativamente sencilla, esta parte se puede hacer por (a) *fundido*; (b) *metalurgia de polvos*; (c) *recalcado* o *forjado*; (d) *extrusión*; (e) *maquinado* o (f) *unión* de dos piezas separadas.

Para la producción de forma final (o neta), los dos procesos adecuados son la fundición y la metalurgia de polvos; cada uno tiene sus propias características, necesidades de herramientas específicas, habilidad de la mano de obra y costos. La parte también se puede elaborar por formado en frío, tibio o caliente. Un método consiste en recalcar (vea cabeceado, figura 14.12), con el que un cilindro de 25 mm (1 pulg) se coloca en una cavidad cilíndrica de un dado para formar el

extremo más largo. Otra posibilidad es la extrusión en frío (variante del forjado en dado cerrado, vea la sección 15.4), o la extrusión parcial directa de un material original de 38 mm (1.5 pulg) para reducir su diámetro a 25 mm. Observe que cada uno de estos procesos produce poco o ningún desperdicio de material, factor importante en la manufactura verde.

Esta parte también se puede elaborar al maquinar una barra de 38 mm de diámetro para reducir la sección inferior a 25 mm. Sin embargo, el maquinado requiere mucho más tiempo que el formado y sería inevitable que se desperdiciara una cantidad considerable de material en forma de virutas (vea la tabla 40.4). Sin embargo, a diferencia de los procesos de forma casi neta, que por lo general requieren dados especiales, el maquinado no involucra herramientas especiales y la operación se ejecuta con facilidad en un torno CNC y a grandes tasas. También observe que la parte se puede fabricar en dos piezas separadas y después unirse con soldadura, soldadura fuerte o unión con adhesivos.

Después de estas consideraciones iniciales, parece que si sólo se necesitaran pocas partes, maquinarlas sería el método más económico. Sin embargo, para una cantidad y tasa elevada de producción, como se dijo, una elección apropiada sería producir el artículo por medio de una operación de recalado o con extrusión en frío. Por último, observe que si por alguna razón técnica las partes superior e inferior de la pieza debieran hacerse de diferentes materiales, entonces podría elaborarse en dos piezas y unir las sería la elección más apropiada.

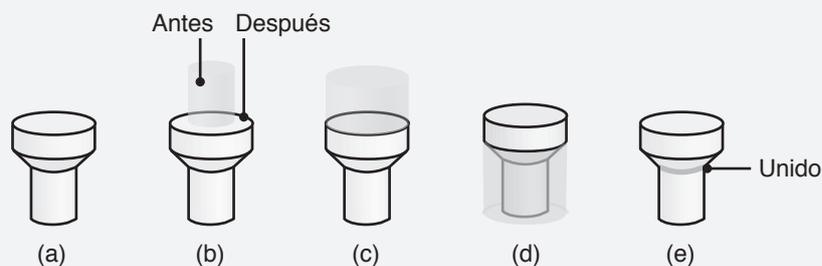


FIGURA 40.5 Diversos métodos para fabricar una parte sencilla: (a) fundición o metalurgia de polvos; (b) forjado o recalado; (c) extrusión; (d) maquinado y (e) unión de dos piezas.

40.10 Costos de manufactura y su reducción

El *costo total* de un producto por lo general consiste en el del material, herramientas, fijo, variable, mano de obra directa e indirecta. Como guía general para la reducción de costos, vea las secciones sobre economía incluidas en cada capítulo con respecto a grupos individuales de procesos y operaciones de manufactura. En función de la compañía particular y el tipo de productos elaborados, se pueden usar diferentes métodos de contabilidad de costos, con metodologías contables que son complejas e incluso controversiales. Más aún, debido a los numerosos factores técnicos y operativos implicados, el cálculo de los factores de costo individuales es difícil, lento y no siempre confiable.

Los **sistemas de costeo**, también llamados *justificación del costo*, suelen incluir las consideraciones siguientes: (a) beneficios intangibles de las mejoras en la calidad y reducción del inventario; (b) costos del ciclo de vida; (c) uso de máquinas; (d) costo de comprar la maquinaria comparado con el de arrendarla; (e) riesgos financieros involucrados en la implementación de sistemas muy automatizados y (f) implementación de nuevas tecnologías y su efecto en los productos.

Además, los costos para el fabricante atribuibles directamente a la *responsabilidad por el producto* son un tema de gran preocupación, y todo producto tiene un costo interno para cubrir posibles reclamos por responsabilidad del producto. Se ha estimado que las demandas por responsabilidad contra los fabricantes de automóviles en Estados Unidos agregan alrededor de \$500.00 dólares estadounidenses al costo indirecto de un vehículo, y debido a los riesgos implicados en su uso, 20% del precio de una escalera se atribuye a los costos por la responsabilidad potencial del producto.

Costos del material. En diferentes tablas a lo largo del libro se dan datos de costos sobre materiales. Debido a las diferentes operaciones involucradas en la producción de materias primas (inventario), sus costos dependen de (a) tipo de material; (b) su historia de procesamiento y (c) su forma, tamaño y características de la superficie. Por ejemplo, por unidad de peso:

- Las barras cilíndricas extruidas son menos caras que las barras que se trabajan con tolerancias estrictas y acabado superficial fino.
- Las barras con sección transversal cuadrada son más caras que las cilíndricas.
- La placa rolada en frío es más cara que la rolada en caliente del mismo espesor.
- El cable delgado es más caro que el grueso.
- El metal en mena es mucho menos caro que los polvos metálicos del mismo tipo.

Costos de las herramientas. Los *costos de las herramientas* llegan a ser muy elevados pero se justifican en grandes volúmenes de producción, como en las aplicaciones automotrices, donde los costos de los dados son de \$2 millones o más. La vida esperada de las herramientas y dados, y su obsolescencia debido a los cambios del producto, también son consideraciones importantes.

Los costos de las herramientas están muy influidos por la operación que realizan; por ejemplo:

- El costo de la herramienta para fundición en dado es más alto que para la fundición en arena.
- Los costos de las herramientas para el maquinado o rectificado son mucho más bajos que para la metalurgia de polvos, forjado o extrusión.
- Las herramientas de carburo son más caras que las de acero de alta velocidad, pero su vida es más larga.
- Si una parte ha de fabricarse por torneado, el costo de la herramienta del torneado convencional es mucho más bajo que para el torneado sin esfuerzos.
- Las herramientas para los procesos de formado de hules son menos caras que los juegos de dados (macho y hembra) que se usan para el estampado profundo y el formado de láminas metálicas.

Costos fijos. Éstos incluyen la energía eléctrica, combustible, impuestos sobre bienes raíces, renta, seguros y de capital (inclusive la depreciación y el interés). Una compañía tiene que pagar los costos fijos sin importar si fabrica o no un producto; de manera que los costos fijos no son sensibles al volumen de producción.

Costos de capital. Estos costos representan los de la maquinaria, herramientas, equipos e inversiones en edificios y terrenos. Como se ve en la tabla 40.5, el costo de las máquinas y sistemas varía mucho, dependiendo de numerosos factores. En vista de los costos generalmente altos del equipo (en particular los que involucran líneas de transferencia y células y sistemas de manufactura flexible), las cantidades y tasas grandes de producción son esenciales para justificar dichos gastos tan grandes, así como para mantener los costos del producto en el nivel competitivo fundamental. Los costos unitarios bajos (costo por pieza) se consiguen por medio de la producción continua, lo que implica tener operaciones las veinticuatro horas del día, en tanto la demanda lo garantice. También es esencial el mantenimiento del equipo con el fin de asegurar la alta productividad, ya que cualquier descompostura de la maquinaria, que genera *tiempo ocioso*, puede resultar muy costosa, tanto como varios miles de dólares por hora.

Costos de mano de obra directa. Estos costos contemplan la mano de obra que está *directamente* involucrada en la manufactura de productos, por lo que también se le conoce como *mano de obra productiva*; entre ellos están los costos de toda la mano de obra, desde la primera vez que se manipula la materia prima, periodo generalmente conocido como *tiempo de piso a piso*. Los costos de la mano de obra directa se calculan con la multiplicación del salario (pago por hora, incluso prestaciones) por la cantidad de tiempo que el trabajador dedica a fabricar la pieza en particular.

El tiempo requerido para producir una parte depende no sólo del tamaño, forma, exactitud dimensional y acabado superficial especificados, sino también del material de la pieza de trabajo en sí. Por ejemplo, las velocidades de corte para maquinar aleaciones de alta temperatura son menores que las que se necesitan para maquinar aluminio o aceros al carbón. Los costos de la mano de obra en la manufactura y ensamble varían mucho de un país a otro (vea la tabla I.7 en la introducción general).

Entonces, es comprensible que la mayor parte de productos que se adquieren hoy día estén elaborados o ensamblados en países donde la mano de obra es barata. Por ejemplo, observe que el mercado global de las bicicletas en 2011 fue de \$61 000 millones y que 66% de las bicicletas se produjo en China. Por otro lado, las empresas localizadas en países con salarios altos para la mano de obra tienden a enfatizar las tareas de la manufactura con *mucho valor agregado* o con grandes niveles de automatización y los incrementos asociados en la productividad, de modo que se reduzca de manera significativa el componente del costo correspondiente a la mano de obra.

Para industrias intensivas en mano de obra, como las de ropa y textiles, fabricación de acero, petroquímicos y procesamiento químico, los fabricantes por lo general consideran llevar la producción a países con salarios más bajos, práctica conocida como **outsourcing**. Si bien este método parece atractivo en lo financiero, los ahorros previstos en el costo no siempre se logran debido a los siguientes costos ocultos asociados con el outsourcing:

- Los envíos internacionales intervienen mucho más, así como su consumo de tiempo, que los nacionales. Por ejemplo, a un barco contenedor le toma aproximadamente de cuatro a seis semanas transportar productos de China a Estados Unidos o Europa, tiempo que aumenta continuamente por aspectos de seguridad nacional. Además, los costos de envío fluctúan mucho y de manera impredecible; por tanto no es posible pronosticar de manera confiable o presupuestar los costos de envío.

TABLA 40.6

Costos relativos de maquinaria y equipo	
Máquina automática para tornillos	M-H
Mandrinado en fresa horizontal	M-H
Brochado	M-H
Embutido profundo	M-H
Taladrado	M-H
Fundición en molde	L-M
Maquinado por descarga eléctrica	L-M
Soldadura por haz de electrones	M-H
Extrusor, polímeros	L-M
Prensa extrusora	M-H
Célula y sistema de manufactura flexible	H-VH
Forjado	M-H
Modelado por deposición fundida	L
Soldadura por arco de gas tungsteno	L
Formado de engranes	L-H
Rectificado	L-H
Descabezadoras	L-M
Asentado, lapeado	L-M
Moldeo por inyección	M-H
Soldadura con rayo láser	M-H
Tornos	L-M
Centro de maquinado	L-M
Prensa mecánica	L-M
Fresadora	L-M
Moldeo por inyección de polvos	M-H
Metalurgia de polvos	L-M
Metalurgia de polvos, HIP	M-H
Soldadura de puntos	L-M
Rolado de anillos	M-H
Robots	L-M
Formado por laminación	L-M
Formado de hule	L-M
Fundición en arena	L-M
Torneado	L-M
Estereolitografía	L-M
Estampado	L-M
Formado por extensión	M-H
Líneas de transferencia	H-VH
Soldadura ultrasónica	L-M

Nota: L = bajo; M = medio, H = alto; VH = muy alto. Los costos varían mucho en función del tamaño, capacidad, opciones y nivel de automatización y controles computarizados. Vea también la sección sobre economía en los diversos capítulos.

- Los programas de envíos largos indican que los beneficios del método de la manufactura justo a tiempo y su ahorro en costos tal vez no fructifiquen. Más aún, debido a los extensos tiempos de envío y a programas rígidos, las modificaciones de diseño no se pueden efectuar con facilidad y las compañías no son capaces de enfrentar con rapidez los cambios del mercado o la demanda. Por tanto, las empresas que practican el outsourcing pierden agilidad y muchas tienen dificultades para adoptar los métodos de la manufactura esbelta.
- En los países con mano de obra barata, los sistemas legales no están tan bien establecidos como en otros. Procedimientos comunes en Estados Unidos y la Unión Europea, como las auditorías contables, protección de los diseños de patente y propiedad intelectual, así como la resolución de conflictos, son más difíciles de hacer cumplir u obtener en aquellos países.
- Debido a que es común esperar pagos con base en las unidades terminadas y ventas, son significativas las consecuencias de los productos defectuosos y su cantidad.
- En el outsourcing hay varios costos ocultos adicionales, como más papeleo de trabajo y documentación, menor productividad de los empleados debido a la baja moral y dificultades en la comunicación.

Por todas estas razones, muchos fabricantes que han subcontratado las actividades de manufactura no han obtenido los beneficios que esperaban; en consecuencia, hace poco se inició la tendencia de *regresar* las actividades de manufactura.

Costos indirectos de la mano de obra. Estos costos se generan en el servicio de la operación total de manufactura, que consiste en actividades como supervisión, mantenimiento, control de calidad, reparaciones, ingeniería, investigación y ventas, así como el costo del personal de oficina. Debido a que no contribuyen directamente a la producción de artículos específicos, estos costos se conocen como *tasa de indirectos* o *tasa de carga* (overhead) y se cobran en forma proporcional sobre todos los productos. El personal involucrado en estas actividades se clasifica como **mano de obra no productiva**.

Costos de manufactura y cantidad de producción. Uno de los factores más significativos en los costos de manufactura es la *cantidad de producción* (vea la tabla 37.2). Es obvio que una cantidad grande de producción requiere tasas grandes de producción, las que a su vez requieren el uso de técnicas de **producción en masa** que involucran maquinaria especial (*maquinaria dedicada*) y emplean menos mano de obra directa proporcionalmente. En el otro extremo, una cantidad de producción pequeña suele significar un involucramiento mayor de la mano de obra directa.

La **producción en lotes pequeños** por lo general implica máquinas de propósito general, como tornos, fresadoras y prensas hidráulicas. El equipo es versátil y se pueden producir partes con diferentes formas y tamaños con los cambios apropiados en las herramientas; sin embargo, los costos de la mano de obra directa son elevados debido a que estas máquinas por lo general son operadas por mano de obra calificada.

En la **producción en lotes medios**, las cantidades son mayores y las máquinas, de propósito general, están equipadas con varias plantillas y accesorios o son controladas por computadora. Para reducir aún más los costos, los centros de maquinado y sistemas de manufactura flexible son alternativas importantes. Por lo general, para cantidades de 100 000 o más, las máquinas están diseñadas para propósitos específicos (*dedicadas*) y realizan varias operaciones particulares con muy poca mano de obra directa involucrada.

Reducción de costos. La *reducción de costos* requiere un estudio de cómo se interrelacionan los costos descritos anteriormente, utilizando los *costos relativos* como un parámetro importante. El costo unitario de un producto puede variar mucho. Por ejemplo, quizá ciertas partes estén hechas de materiales caros pero requieran muy poco procesamiento, como en el caso de la acuñación de monedas de oro; en consecuencia, el costo de los materiales relacionados con el de la mano de obra directa es alto.

Por el contrario, algunos productos requieren varias etapas de producción complejas y caras para procesar materiales relativamente baratos, como los aceros al carbono. Un motor eléctrico, por ejemplo, está hecho de materiales relativamente baratos, aunque estén involucradas varias operaciones diferentes de manufactura en la fabricación de la cubierta, rotor, rodamientos, escobillas y otros componentes. A menos que esté muy automatizada, las operaciones de ensamble de estos productos se vuelven una parte significativa del costo total (vea la sección 37.9).

En la década de 1960 la mano de obra abarcaba 40% del costo de producción; hoy día es muy bajo: 5%, lo que depende del tipo de producto y nivel de automatización (vea la tabla I.6). También observe que la contribución de la fase de diseño es de sólo 5%, aunque es el *diseño* el que por lo general tiene la mayor influencia en la calidad y éxito del producto en el mercado.

Como se ha dicho en todo el libro, hay varias oportunidades para la reducción de costos. La introducción de más sistemas automatizados y la adopción de tecnologías modernas son medios obvios de disminuir algunos costos. Sin embargo, este método debe emprenderse después de hacer un análisis del costo-beneficio, lo cual requiere la entrada de datos confiables y la consideración de todos los factores técnicos y humanos implicados. Las tecnologías avanzadas, algunas de las cuales son muy costosas de implementar, deben considerarse sólo después del análisis completo de los factores de costo más obvios, el cual se conoce como *retorno de la inversión* (ROI, por sus siglas en inglés).

40.10.1 Análisis del valor

La manufactura agrega *valor* a los materiales conforme se convierten en partes, componentes y productos individuales para después ser comercializados. Debido a que el valor se agrega por etapas individuales durante la creación del producto, es importante el empleo del análisis del valor, también llamado *ingeniería del valor*, *control del valor* y *administración del valor*. Por tanto, el análisis del valor es un sistema que evalúa cada etapa del diseño, selección del material y del proceso y las operaciones con el fin de manufacturar un producto que lleve a cabo todas sus funciones buscadas y lo haga al costo más bajo posible.

En este análisis, desarrollado en General Electric Co., durante la Segunda Guerra Mundial, se establecía un valor monetario para cada uno de dos atributos del producto: (a) **valor de uso**, que refleja las funciones del producto, y (b) **valor de estima** o de **prestigio**, que refleja la atracción del producto y hace deseable su posesión. Entonces, el *valor de un producto* se define como

$$\text{Valor} = \frac{\text{Función y desempeño del producto}}{\text{Costo del producto}} \quad (40.1)$$

Aunque hay diferentes versiones, el análisis del valor consiste básicamente en las seis siguientes fases:

1. *Fase de información*: compilación de datos y determinación de costos.
2. *Fase de análisis*: definición de funciones e identificación de problemas tanto como de oportunidades.
3. *Fase de creatividad*: búsqueda de ideas con el fin de responder a problemas y oportunidades, sin juzgar el valor de cada idea.
4. *Fase de evaluación*: selección de las ideas que se van a desarrollar e identificación de los costos implicados.
5. *Fase de implementación*: presentación de los hechos, costos y valores a la dirección de la empresa; desarrollo de un plan y motivar la acción positiva, todo con el fin de lograr el compromiso de los recursos necesarios para completar la tarea.

6. *Fase de revisión*: reexaminar todo el proceso de análisis del valor con objeto de hacer los ajustes necesarios.

El análisis del valor por lo general es coordinado por un ingeniero del valor y se lleva a cabo en conjunto con los diseñadores, ingenieros de manufactura y el personal de control de calidad, compras y marketing, y debe tener el apoyo de la alta dirección de la empresa. La implementación del análisis del valor en la manufactura da por resultado beneficios como (a) reducción significativa del costo; (b) menores tiempos del ciclo; (c) mejor calidad y desempeño del producto; (d) disminución del tiempo de manufactura del artículo y (e) reducción del peso y tamaño del producto.

RESUMEN

- Independientemente de lo bien que un producto cumpla con las especificaciones de diseño y los estándares de calidad, también debe satisfacer criterios económicos con el fin de que sea competitivo en el mercado nacional y mundial.
- Las consideraciones importantes en el diseño y la manufactura del producto incluyen las características de los materiales con respecto a la manufactura, la esperanza de vida del artículo, ingeniería del ciclo de vida y cuidado en minimizar cualquier daño potencial al ambiente y ecosistema de la Tierra.
- La sustitución de materiales, la modificación y simplificación del diseño del producto y el relajamiento de la tolerancia dimensional y de los requerimientos de acabado superficial están entre los métodos más importantes de reducción del costo.
- El costo total de un producto incluye varios elementos, como los costos de materiales, herramientas, capital, mano de obra e indirectos. Los costos del material se pueden reducir a través de la selección cuidadosa, sin comprometer el diseño ni los requerimientos de servicio, funciones, especificaciones o estándares para la buena calidad del producto.
- En los países muy industrializados, los costos de la mano de obra por lo general se están convirtiendo en un porcentaje cada vez más pequeño de los costos de producción. Para contrarrestar los bajos salarios en ciertos países en vías de desarrollo, los costos de la mano de obra se pueden reducir aún más por medio de equipo y operaciones automatizados y controlados por computadora.

TÉRMINOS CLAVE

Análisis costo-beneficio	Costos fijos	Mano de obra indirecta	Retorno de la inversión
Análisis del valor	Costos relativos	Mano de obra no productiva	Tasa de carga
Bases de datos inteligentes	De la cuna a la cuna	Manufactura sustentable	Tasa de indirectos
Cantidad de producción	De la cuna a la tumba	Máquinas dedicadas	Tasa de producción
Cantidad económica de pedido	Desperdicio	Outsourcing	Tiempo de piso a piso
Capacidades del proceso	Evaluación del ciclo de vida	Reciclado	Tiempo del ciclo
Clase mundial	Justificación del costo	Reducción del costo	Tiempo ocioso
Costos de capital	Mano de obra directa	Regresar	Valor

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, D. M., *Design for Manufacturability & Concurrent Engineering*, CIM Press, 2010.
- Andrae, A. S. G., *Global Life Cycle Assessments of Material Shifts*, Springer, 2009.
- Ashby, M. F., *Materials Selection in Mechanical Design*, 4a. ed., Butterworth-Heinemann, 2010.
- ASM Handbook*, Vol. 20: *Materials Selection and Design*, ASM International, 1997.

- Boothroyd, G., Dewhurst, P., y Knight, W., *Product Design for Manufacture and Assembly*, 3a. ed., CRC Press, 2010.
- Bralla, J. G., *Design for Manufacturability Handbook*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1999.
- Cook, H. F. y Wissmann, L. A., *Value Driven Product Planning and Systems Engineering*, Springer, 2010.
- Fiksel, J., *Design for the Environment*, 2a. ed., McGraw-Hill, 2011.
- Giudice, F., La Rosa, G. y Risitano, A., *Product Design for the Environment*, CRC Press, 2006.
- Harper, C. A. (ed.), *Handbook of Materials for Product Design*, McGraw-Hill, 2001.
- Hundai, M. (ed.), *Mechanical Life Cycle Handbook*, CRC Press, 2001.
- Kutz, M., *Environmentally Conscious Manufacturing*, Wiley, 2007.
- Madu, C. (ed.), *Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing*, Springer, 2011.
- Magrab, E. B., Gupta, S. K., McCluskey, F. P. y Sandborn, P., *Integrated Product and Process Design and Development: The Product Realization Process*, 2a. ed., CRC Press, 2009.
- Mangonon, P. C., *The Principles of Materials Selection for Engineering Design*, Prentice Hall, 1998.
- McDonough, W. y Braungart, M., *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, 2002.
- Poli, C., *Design for Manufacturing: A Structured Approach*, Butterworth-Heinemann, 2001.
- Ribbens, J., *Simultaneous Engineering for New Product Development: Manufacturing Applications*, Wiley, 2000.
- Seliger, G. (ed.), *Sustainability in Manufacturing*, Springer, 2010.
- Swift, K. G. y Booker, J. D., *Process Selection: From Design to Manufacture*, 2a. ed., Butterworth-Heinemann, 2003.
- Ulrich, K. y Eppinger, S., *Product Design and Development*, 5a. ed., McGraw-Hill, 2011.
- Wenzel, H., Hauschild, M. y Alting, L., *Environmental Assessment of Products*, Springer, 2003.

PREGUNTAS DE REPASO

- 40.1** Explique qué se entiende por propiedades de manufactura de los materiales.
- 40.2** ¿Por qué la sustitución de materiales es un aspecto importante de la ingeniería de manufactura?
- 40.3** ¿Qué factores están involucrados en la selección de los procesos de manufactura? Explique por qué son importantes.
- 40.4** ¿De qué manera resulta significativa la cantidad de producción en la selección del proceso? Explique.
- 40.5** Ponga en una lista y describa los principales costos involucrados en la manufactura.
- 40.6** ¿Por qué influye la selección del material en los requerimientos de energía para los productos?
- 40.7** Describa la evaluación del ciclo de vida y la ingeniería del ciclo de vida.
- 40.8** Defina qué se entiende por cantidad económica de pedido.
- 40.9** Explique la diferencia entre el costo directo y el costo indirecto de la mano de obra.
- 40.10** Describa lo que entienda de los siguientes términos: (a) expectativa de vida; (b) ingeniería del ciclo de vida; (c) manufactura sustentable y (d) manufactura verde.
- 40.11** ¿Cuál es la diferencia entre cantidad de producción y tasa de producción?
- 40.12** ¿Hay alguna diferencia significativa entre la producción de la cuna a la tumba y la de la cuna a la cuna? Explique.
- 40.13** ¿Cómo definiría valor? Explique.
- 40.14** Defina la manufactura sustentable.
- 40.15** ¿Cuál es el significado e importancia del término retorno de la inversión? Explique.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 40.16** Describa las principales consideraciones involucradas en la selección del material para los productos.
- 40.17** ¿Cuál es el significado de las capacidades del proceso de manufactura? Seleccione cuatro diferentes procesos de manufactura y describa sus capacidades.
- 40.18** Comente acerca de la magnitud y rango del desperdicio que se presenta en la tabla 40.4 y las razones de que haya variaciones.
- 40.19** Explique por qué el valor del desperdicio producido en un proceso de manufactura depende del tipo de material y de los procesos involucrados.
- 40.20** Describa sus observaciones acerca de la información que se da en la tabla 6.1.
- 40.21** Además del tamaño de la máquina, ¿qué otros factores están involucrados en el rango de precios de cada categoría de máquina que se muestra en la tabla 40.6? Explique.
- 40.22** Explique por qué se requieren diferentes cantidades de energía para producir distintos materiales. Considere tanto el material como la historia de procesamiento.
- 40.23** Consulte la tabla 40.2 y explique por qué es esencial reciclar aluminio y magnesio. Desde el punto de vista de un ciclo de vida, explique por qué deben usarse o no aluminio y magnesio en los automóviles.
- 40.24** Explique cómo se puede justificar el alto costo de algunas de las máquinas que se listan en la tabla 40.6.

40.25 Con base en los temas cubiertos en este libro, explique las razones de las posiciones relativas de las curvas que aparecen en la figura 40.2.

40.26 ¿Cuáles factores están involucrados en la forma de la curva que se muestra en la figura 40.4? Explique.

40.27 Describa los problemas a que se tendría que enfrentar al reducir la cantidad de material en los productos. Presente algunos ejemplos.

40.28 Explique las razones de que haya un gran deseo en la industria de practicar la manufactura de forma casi final (neta).

40.29 Exponga y explique sus reflexiones acerca de la manufactura de la cuna a la cuna.

40.30 ¿Por qué es importante la cantidad de desperdicio producido en un proceso de manufactura?

40.31 Analice las ventajas de los tiempos de ciclo largos, si las hubiera, en la producción.

40.32 Revise la tabla 40.2 y estime la huella de carbono de los materiales (masa de carbono producido por masa o volumen de material) si la energía usada para producirlos se obtiene de (a) fuentes hidroeléctricas, eólicas o nucleares, o (b) del carbón.

40.33 Explique por qué cuanto mayor sea la cantidad por paquete de productos alimenticios, menor es el costo por peso unitario.

40.34 Enumere y explique las ventajas y desventajas de subcontratar con outsourcing las actividades de manufactura en países con costos bajos de mano de obra.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

40.35 Como puede ver, la tabla 40.5 sólo presenta metales y sus aleaciones. Con base en la información dada en varios capítulos del libro y en otras fuentes, prepare una tabla parecida para materiales no metálicos que comprenda cerámicos, plásticos, plásticos reforzados y materiales compósitos tanto de matriz metálica como de cerámica.

40.36 ¿Es conveniente comprar siempre materiales que estén cerca de las dimensiones finales de la parte que se va a manufacturar? Explique por qué sí o no y dé algunos ejemplos.

40.37 ¿Qué acción tomaría usted si el suministro de la materia prima seleccionada para una línea de productos se hiciera poco confiable? Explique.

40.38 Estime la posición de las curvas para los siguientes procesos en la figura 40.4: (a) rectificado sin centro; (b) maquinado electroquímico; (c) fresado químico y (d) extrusión.

40.39 Revise la figura I.2 en la introducción general y presente sus reflexiones acerca de los dos diagramas de flujo. ¿Querría usted hacer algunas modificaciones? Y si así fuera, ¿cuáles serían?

40.40 Con el paso de los años, numerosos productos para el consumidor (como los teléfonos de disco, receptores de radio analógicos, tornamesas y bulbos) se han vuelto obsoletos o están cerca de serlo, mientras que muchos productos nuevos han entrado al mercado. Elabore dos listas: una exhaustiva de productos obsoletos que usted recuerde y otra de nuevos productos. Comente las razones de los cambios que observe.

40.41 Elabore una lista y analice los diferentes métodos y sistemas de manufactura que han permitido la fabricación de nuevos productos (recuerde que dichos productos y sistemas son conocidos como tecnologías facilitadoras).

40.42 Seleccione tres diferentes productos y haga una investigación de los cambios de precio que hayan tenido en los últimos 10 años. Analice las posibles razones de dichos cambios.

40.43 Describa sus pensamientos sobre el reemplazo del aluminio en las latas de bebidas en relación con las hechas de acero.

40.44 Seleccione tres diferentes productos que se encuentren normalmente en el hogar. Exprese sus opiniones sobre (a) los materiales que se usaron en cada artículo; (b) por qué se eligieron dichos materiales; (c) cómo se manufacturaron los productos y (d) por qué se aplicaron esos procesos en particular.

40.45 Comente acerca de las diferencias, si las hubiera, entre los diseños, materiales y métodos de procesamiento y ensamble usados para fabricar productos como herramientas de mano y escaleras para uso profesional y para uso del consumidor.

40.46 En la figura 6.1 se muestra la sección transversal de un motor de jet. Con base en los temas cubiertos en el libro, seleccione tres componentes cualesquiera del motor y describa los materiales y procesos que usaría para fabricarlos en una cantidad de, digamos, 1000.

40.47 Inspeccione algunos productos en su hogar y describa cómo haría para desarmarlos rápido y por completo con el fin de reciclar sus componentes. Comente sobre su diseño con respecto a la facilidad con que los desensambló.

40.48 ¿Qué productos conoce usted que podrían ser muy difíciles de desensamblar con propósitos de reciclado? Explique.

40.49 Haga una investigación bibliográfica y realice la evaluación del ciclo de vida de un automóvil típico. Estime la cantidad de energía necesaria para producirlo a partir de sus materias primas y compárela con la energía consumida por el vehículo durante su vida planeada de 160 000 km (100 000 millas). ¿Qué recomendaciones haría usted con respecto a usar aluminio y magnesio en lugar de acero en los automóviles?

40.50 Analice los intercambios involucrados al seleccionar entre los dos materiales para cada una de las aplicaciones listadas:

- a. Sillas de lámina metálica *versus* plástico reforzado.
- b. Cigüeñales forjados *versus* fundidos.
- c. Bielas forjadas *versus* metalurgia de polvos.
- d. Placas de interruptores eléctricos de plástico *versus* metálicos.
- e. Jarras de agua de vidrio *versus* metálicas.
- f. Cubiertas de lámina metálica *versus* fundidas.
- g. Clavos de acero *versus* cobre.
- h. Mangos de martillos de madera *versus* metálicos.

Analice también las condiciones típicas a que estarían sujetos estos productos durante su uso normal.

40.51 Analice los factores que influyen en la elección entre los siguientes pares de procesos para fabricar los productos indicados:

- a. Fundición en arena *versus* fundición con dados de una cubierta fraccionada de motor eléctrico.
- b. Maquinado *versus* formado de un engrane cónico de gran diámetro.
- c. Forjado *versus* metalurgia de polvos para producir una leva.
- d. Fundición *versus* estampado de una cacerola de lámina metálica.
- e. Fabricación de muebles veraniegos para el exterior de tubería de aluminio *versus* hierro fundido.
- f. Soldadura *versus* fundición de estructuras de máquinas herramienta.
- g. Roscas con laminado *versus* maquinado de un tornillo para una aplicación de alta resistencia.
- h. Termoformado de un plástico *versus* moldeo de un termofijo para hacer el aspa de un ventilador doméstico barato.

40.52 En la figura P40.52 se ilustra una parte en forma de sija que debe producirse; hay dos métodos en consideración. La parte se puede formar colocando una pieza plana de lámina metálica entre dos dados para luego cerrarlos y obtener la forma deseada; la parte también se puede fabricar por formado explosivo, según se ilustra. (a) Enumere las ventajas y desventajas de ambas opciones, si la parte mide 2 m (80 pulg) de diámetro y sólo se requieren 50 partes. (b) ¿Qué otros procesos de manufactura serían apropiados para producir esta parte?

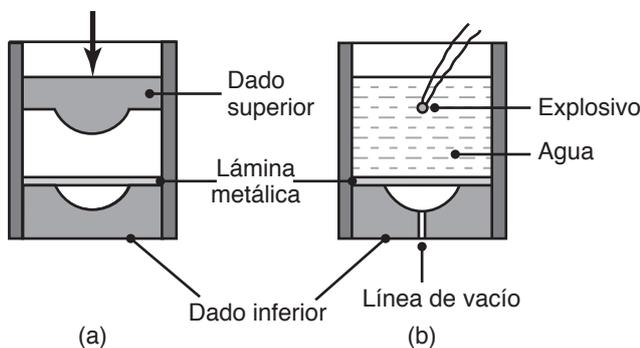


FIGURA P40.52

40.53 La figura P40.53 muestra una parte de lámina metálica hecha de acero:

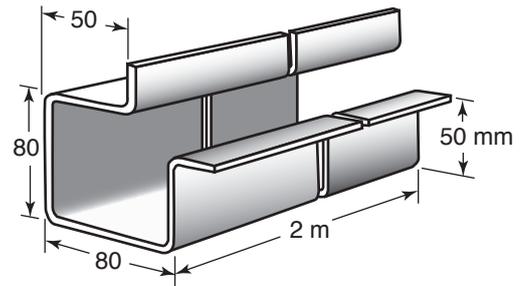


FIGURA P40.53

Analice cómo se podría fabricar esta parte y cómo podría cambiar el proceso de manufactura seleccionado por usted si (a) el número de partes requerido aumenta de 10 a varios miles y (b) la longitud de la parte se incrementa de 2 a 20 m.

40.54 La parte que se ilustra en la figura P40.54 es un segmento (parcial) de engrane de acero al carbono:

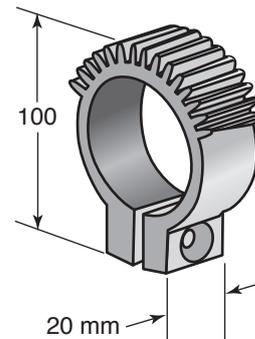
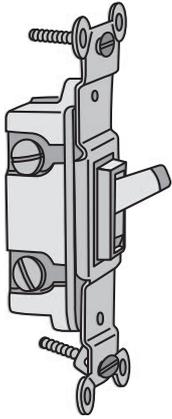


FIGURA P40.54

El pequeño barreno situado en la parte inferior es para sujetar la parte en un eje cilíndrico por medio de un tornillo y una tuerca. Sugiera una secuencia de procesos de manufactura para fabricar esta parte. Considere factores como la influencia del número de partes requerido, tolerancias dimensionales y acabado de la superficie. Analice procesos como el maquinado de una barra, extrusión, forjado y metalurgia de polvos.

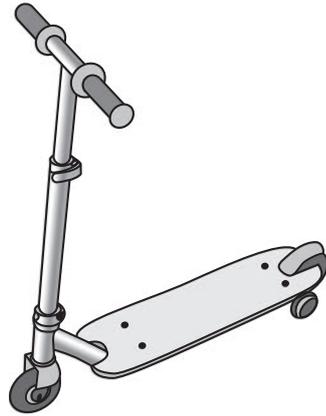
40.55 a 40.59 Revise los productos que se ilustran a continuación. Para cada componente, (a) describa lo que usted piensa acerca del material o materiales que sería apropiado usar y (b) especifique un proceso o procesos de manufactura que pudieran emplearse para fabricar cada uno. Luego suponga que

después de presentar sus recomendaciones, se le dice que el producto es demasiado caro de producir según lo recomienda usted. Sugiera los cambios que podría hacer para reducir el costo total; explique sus razones.



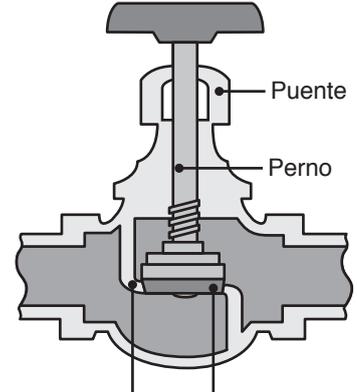
Interrupción

FIGURA P40.55



Patineta

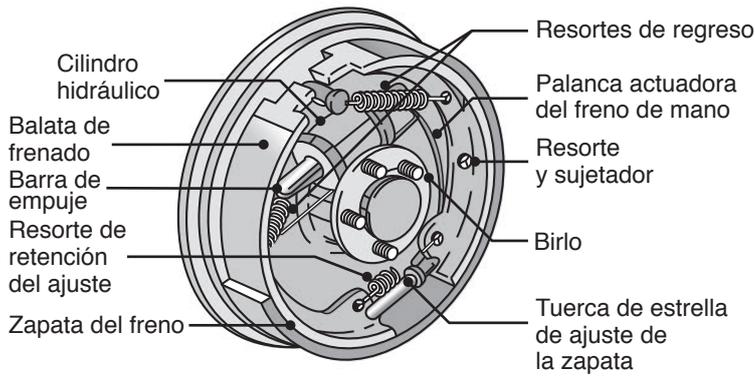
FIGURA P40.56



Asiento de la válvula
Empaque

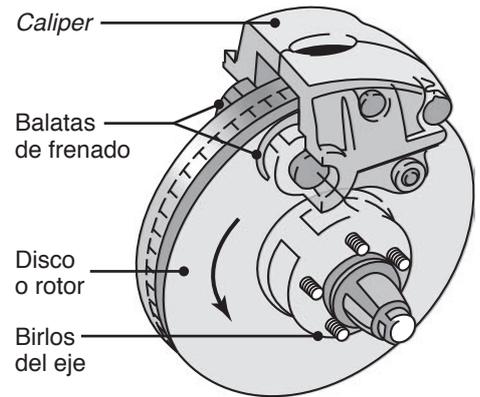
Válvula de globo

FIGURA P40.57



Tambor de frenado

FIGURA P40.58



Freno de disco

FIGURA P40.59

Índice

- A
 - Abarrilado, 65, 75, 339
 - Ablación, molde, 266
 - Abocardado, 654
 - Abocinado, 409
 - Abombados, tubos, 410-411
 - Abrasivo
 - aglomerados, 733
 - bandas, 757
 - desgaste, 974-975
 - granos, 730
 - maquinado, 729
 - maquinado por chorro de agua, 789
 - Abrasivos, 729
 - designaciones, 735-736
 - en gel inseminado, 732
 - Abrazaderas, 1089
 - Abriantado, 761
 - Acabado
 - a vibración, 762
 - acabado, 696
 - bisel, 696
 - calidad, 699
 - cerámicos, 482
 - de corte, 589, 631
 - de fundiciones, 298
 - engranes, 696
 - metalurgia de polvos, 464
 - microscópicos, 23
 - operaciones de, 758
 - procesos, 21
 - rectificado, 697
 - superficial, 1153
 - Accesorios
 - de lápida, 1089
 - flexibles, 1089
 - inteligentes, 1089
 - Acción capilar, 935
 - herramientas de corte, 617
 - Aceites, 978
 - compuestos, 978
 - de corte, 618
 - minerales, 978
 - solubles en agua, 978
 - Aceptación
 - nivel de calidad, 1047
 - muestreo de, 1047
 - Acero
 - al alto carbono, 137
 - al bajo carbono, 137
 - al medio carbono, 137
 - calmado, 133
 - calmado desoxidado con aluminio, 133
 - efervescente, 133
 - galvanizado, 999
 - parcialmente desoxidado, 133
 - semicalmado, 133
 - Aceros, 137
 - a la intemperie, 139
 - aleados, 139
 - con plomo, 592
 - de alta velocidad de la serie M, 604
 - de alta velocidad de la serie T, 604
 - de baja aleación, 139
 - de maquinado libre, 592
 - de ultra alta resistencia, 141
 - desoxidados con calcio, 592
 - en bifásicos, 141
 - fundidos, 307
 - grado de fase compleja, 141
 - grado martensítico, 141
 - inoxidables, 142
 - austeníticos, 143
 - de estructura dúplex, 144
 - ferríticos, 143
 - fundidos, 307
 - martensíticos, 143
 - propiedades mecánicas, 143
 - laminados recubiertos
 - previamente, 999
 - microaleados, 141
 - nanoaleados, 141
 - para trabajo en caliente, 145
 - refosforados, 138
 - resistentes al impacto, 145
 - resulfurados, 138
 - trabajados en frío, 145
 - TRIP, 141
 - TWIP, 141
- Acetales, 182, 183
- Acetileno, 878
- Acondicionamiento
 - de piedras de esmeril, 744
 - de rodillos, 323
- Acortamiento en caliente, 47, 375
- Acrílicos, 184
- Acrolonitrilo-butadieno-estireno, 184
- Acumulación de metal controlado, 551
- Acuñado, 343, 464
- Acústica(o)
 - emisión, 589, 1049
 - holografía, 1052
 - impacto, 1050
 - onda, 1078
- Adhesión, 969
- Adhesivo
 - cinta, 945
 - desgaste, 973
 - enlace, 970
 - pegado, 876
 - diseño de junta, 949
- Adhesivos, 940-949
 - acrílicos, 944, 946
 - anaeróbicos, 944, 946
 - basados en epoxi, 946
 - de adherencia retrasada, 945
 - de cianoacrilato, 944, 946
 - de silicón, 946
 - de uretano, 946
 - evaporables, 944
 - fundidos calientes, 944
 - inorgánicos, 944
 - naturales, 944
 - orgánicos sintéticos, 944
 - químicamente reactivos, 944
 - térmicamente conductores, 945
- Aditivos
 - a presión extrema, 979
 - aceites, 979
 - cerámicos, 477
 - plásticos, 182
- Afilado, 744
- Afloramientos, 263
- Agente
 - de nucleación, 242
 - humectante, 477
- Agentes de ataque, 770
- Agilidad, 30
- Agitación, 117
- Aglutinante
 - de resina sintética, 735
 - vitrificado, 735
- Aglutinantes
 - arena, 261
 - cerámicos, 477
 - polvos metálicos, 450
- Agregación, 1003
- Agrietamiento
 - caliente, soldaduras, 900
 - central, 375, 382
 - cerámicos, 202
 - corrosión bajo esfuerzo, 79, 81, 96
 - Chevron, 375
 - de abeto, 375
 - en la extrusión, 375
 - interno, 375
 - por esfuerzo ambiental, 179
 - por esfuerzo de corrosión, 79, 81, 96
 - temporal, 79
 - térmico, 202
- Agua
 - absorción de, polímeros, 180
 - atomización, 446
- Agujón, 392
- AJM directa, 557
- Aire
 - calibradores de, 1016
 - corte por arco de carbono, 895
 - cubierta de, 754
 - cuchilla de, 940
 - flexión por, 404
- Aislantes, 94
- Ajuste, 1024
- Álabes de turbina, 39
 - fundición, 285
- Alambre
 - alambrón, 323
 - cepillado, 757
 - EDM, 782
 - marco, 1106
 - rociado de arco, 989
 - sierras, 689
 - unión, 830
- Alclad, 988
- Aleación, 41
 - elementos de, 109
 - en los aceros, 136
 - mecánica, 448
 - polvos metálicos, 448
- Aleaciones
 - de alta temperatura, 159
 - fundición, 305
 - de baja dilatación, 94
 - de bajo punto de fusión, 162
 - ferrosas, 128
 - fundición, 307
 - resistentes al calor, 159
- Alfa ferrita, 107
- Alimentadores, 243
- Almacenamiento
 - en la nube, 1070
 - y recuperación, automático, 1078
- Alotropismo, 41
- Alquídicos, 186
- Alta eficiencia
 - filtro de aire en partículas, 803
 - rango de maquinado, 726
- Alta frecuencia
 - soldadura por inducción, 921
 - soldadura por resistencia, 921
- Alta presión, síntesis a alta temperatura, 209
- Alta resistencia
 - aceros de baja aleación, 139
 - aceros, propiedades mecánicas, 139
- Alta velocidad
 - aceros, 144, 604
 - ensamble automatizado, 1091-1094
 - fresado frontal, 677
 - maquinado, 719
 - roscado, 663
- Altura máxima de rugosidad, 967
- Alto horno, 129-130
- Alúmina, 196-197
 - fundida, 732
 - sin fundir, 732
- Aluminio
 - abrasivos, 731-733
 - aleaciones, características de manufactura, 153
 - aleaciones, propiedades mecánicas, 152
 - automóvil de, 154
 - designación de aleación, 153
 - óxido de, 196
 - poroso, 153
 - producción de, 153
 - recubrimientos de, 609, 612
 - y sus aleaciones, 151, 303
- Ambientes, sistemas expertos, 1136
- Aminos, 186
- Amordazamiento
 - máquinas, 641
 - rimas, 661
- Aleaciones amorfas, 49, 165, 286
- Polímeros amorfos, 176
- Amortiguador, 1093
 - almacenamiento, 1066
 - capa, 844
- Amortiguamiento
 - externo, 718
 - hierro fundido, 712
 - interno, 718
 - máquinas herramienta, 713, 718
- Amplificación, 1021
- Instrumentos analógicos, 1010
- Sensores analógicos, 1085
- Anclamiento, 106
- Ángulo
 - bloques calibradores, 1015
 - de alivio, 653
 - de ataque posterior, 629
 - de desprendimiento, 568, 629
 - de filo del cincel, 653
 - de giro, 66
 - de hélice, 653
 - de incidencia final, 577
 - de inclinación, 576
 - de labio, 569, 629
 - de salida
 - forjado, 342, 353
 - fundiciones, 297
 - del filo de corte, 629
 - final del filo, 577
 - fresadoras, 678
 - instrumentos de medición, 1012
 - lateral de alivio, 577
 - lateral de arrastre, 577, 629
 - normal de ataque, 576
 - óptimo de dado, en el trefilado, 379
- Anidamiento, 393
- Anillo
 - calibradores de, 1016
 - ensayo de compresión, 971
 - laminación, 329
- Anión, 39
- Anisotropía, 43, 48
 - cristales, 43
 - cristalográfica, 49, 399
 - dilatación térmica, 93
 - láminas metálicas, 48, 399, 404
 - normal, 413
 - plana, 415
 - plástica, 413
 - relación de, 821
- Anodizado, 998
- Ánodo de sacrificio, 995
- Antioxidantes, 183
- Anvil, 338

- Aplanado
 - de rodillos, 322
 - por calandrado, 324
 - por flexión, 410
- Aporte
 - alambre de, 879, 884
 - metal de, 877, 879, 935-936
 - varilla de, 879
- Apron, 637
- Aramidas, 185, 220
- Arandelas bloqueantes, 950
- Árbol, en la fundición por revestimiento, 272
- Árboles, 678
- Arcilla, 196
- Arco
 - corte, 895
 - deposición, 991
 - formado, 900
 - transferido, 884
- Área real de contacto, 969
- Arena
 - de banco, 260
 - de lago, 260
 - fundición en, 260, 265
 - máquinas de moldeo, 263
 - moldes, 261
 - naturalmente pegada, 260
 - para moldeo en verde, 261
- Arenas sintéticas, 260
- Arenilla
 - chorro, 762
 - número, 732
- Aro de sujeción, 412
- Arreglo de pernos en red, 832
- Arreglos ortogonales, 1034
- Arrugamiento, 412
 - (pliegues), 415
- Arseniuro de galio, 805
- Asentado, 758
 - engranes, 698
- Aserrado, 688
 - EDM, 784
- Aspereza, 969-970
- Aspersión centrífuga, 486
- Aspiración, 244
- Astilla, 974
- Astroloy, 159
- Ataque
 - intergranular, 965
 - selectivo, 771
- Atomización, 446
 - centrífuga, 447
- Átomos, 39
 - receptores, 102
- Atributos de diseño, 1117
 - consideraciones
 - brocha, 687
 - cerámicos, 489
 - maquinado químico, 775
 - perforado, 652
 - procesamiento de compósitos, 528
 - soldadura fuerte, 939
 - directrices, fresado, 680
 - EDM, 782
 - fundiciones, 294
 - manufactura, 1117
 - maquinado
 - de engranes, 698
 - electroquímico, 778
 - por haz de electrones, 787
 - por rayo láser, 786
 - ultrasónico, 756
 - metalurgia de polvos, 466-469
 - proceso, 6-7
 - rectificado, 755
 - rectificado electroquímico, 780
 - roscado, 650
 - similitudes, 1114
 - sujetadores mecánicos, 952
 - taladrado, 660
 - torneado, 646
 - vidrios, 489
- Ausformado, 123
- Austenita, 107
 - formador, 109
 - retenida, 112
- Austenización, 114
- Austenizado, 122
- Autoclave, 268
- Autocolimador, 1013
- Autointersticial, 44
- Autolubricante, 970
- Automáticas tipo suizo, 641
- Automatización, 1060-1061
 - de posición fija, 1065
 - dura, 1065
 - fija, 1062
 - flexible, 1067
 - historia, 1061
 - implementación, 1063
 - programable, 1067
 - selectiva, 1065
 - suave, 1067
- Avance, 566
 - ángulo de, 674
 - barra de, 637
 - cruzado, 748
 - fuerza de, 630
 - marcas de, 590, 673
 - tiempo, 1154
 - tornillo, 640, 649
 - velocidad de, 671
- Avanzado(s)
 - maquinado, 769
 - materiales compósitos, 224
- Avellanado, 654
- Aviones, compósitos en, 229
- Azul
 - fragilidad, 77
 - maquinado con arco, 782
- B**
- Babbitts, 166
- Bainita, 112
- Baja presión
 - deposición química por vapor, 808
 - fundición, 278
 - por contragravedad, proceso, 276
 - rociado de plasma, 989
- Balizado, 987
- Bancada, 637
- Banco
 - esmeril de, 753
 - torno de, 640
- Banda
 - abrasiva, 757
 - de esmeril, 757
 - limas, 692
 - sierra, 397, 689
- Bandas
 - de inclusiones, 49
 - de Lüder, 324, 397-398
- Barra
 - de arranque, 134
 - inactiva, 134
 - trefilado de, 377
- Barril
 - acabado, 762
 - recubrimiento, 995
- Base
 - de datos, 1105
 - metal, soldadura, 896
 - placa, 1089
- Bases
 - de datos inteligentes, 1149
 - de máquinas herramienta, 714
- Bastidores, laminación, 327
- Bat, 479
- Baterías recargables, 181
- Bates de béisbol, 15
- Bauxita, 153
- Bebedero, 243
 - diseño, 244
- Beneficiados, 129
- Berilio, 162
 - de cobre, 156, 162
- Biocerámicos, 204
- Bisagra, micromaquinado
 - superficial, 846
- Bisel
 - corte, 695
 - engranes, 696
 - transportador, 1012
- Biselado de perforaciones, 395
- Blenda de zinc, 163
- Bloom, 317, 323
- Bloque inactivo, 366
- Bloqueo, 343
- Bobina de entrega, 322
- Bola
 - arreglo en malla, 832
 - bruñido, 987
 - fresa, 447-448
 - rectificado de cojinetes, 748
- Bombardeo iónico por magnetron, 808
- Borazón, 613
- Borde
 - acumulado, 571, 590
 - virutas, 571-572
 - dislocación, 44
 - redondeo, 587
- Bordeado, 407
- Bordes ondulados, 415
 - en el laminado, 325
- Boronización, 119-120
- Brazo de intercambio de herramientas, 706
- Brazo oscilante, 919
- Brazo y muñeca, robots, 1079
- Brinell
 - dureza, 67
 - ensayo, 69
- Broca
 - filos (gavilanes), 657
 - vida, 659
- Brocas para mampostería, 655
- Brochado, 684, 693
 - en torno, 686
 - máquinas de, 686
- Brochas, 684
- Bronce, 156
 - arquitectónico, 157
 - fosforado, 156
 - propiedades mecánicas del, 157
- Bruñido, 387, 987
 - engranes, 697
- Buckyballs, 208
- Buen control estadístico, 1044
- C**
- Cabeceado, 345
- Cabeceras, 346
- Cabeza
 - de índice, 683
 - de turco, 381
- Cabezal, 682
 - divisor universal, 683
 - seguidor de dado, 649
- Cabezales de dado de apertura automática, 649
- Cabrestante, 383
- Cachetes, 261
- Caja, 261
- Calandrado, 517
- Calibración, 1021
- Calibrado, 345, 464
 - forjado, 349
- Calibrador
 - GO, 1015
 - telescópico, 1012
- Calibradores, 1011
 - de freno compósitos con matriz de aluminio, 227
 - fijos, 1015
 - Vernier, 1011
- Calibre, 1010
 - bloques, 1015
 - longitud, 57, 59
 - NO PASA, 1015
 - números, laminado, 326
 - regla del fabricante, 1021
- Calibres, 1015
 - de inserción, 1015
 - neumáticos, 1016
- Calidad, 28, 1031
 - aseguramiento de la, 28, 1031
 - normas de, 1038
 - certificación del proceso, 29, 1038
 - círculo de, 1032
 - control de, 1031
 - ingeniería de, 1032, 1034
 - normas, 29
 - normas de gestión, 1038
 - revolución de la, 6
 - total
 - administración de la, 28, 1032
 - control de la, 1032
- Calor, 81
 - específico, 92
 - de materiales diversos, 89-90
 - latente
 - de fusión, 238
 - de solidificación, 104
 - rectificado, 742
 - sumideros, 371
 - transferencia de, 883
 - en la fundición, 246-247
 - tratamiento, 101
 - aleaciones ferrosas, 111
 - aleaciones no ferrosas, 117
 - de rayos láser, 785
 - verificación, 94, 280, 742, 975
- Cambiator
 - automático de tarimas, 706
 - de herramientas, automático, 642, 706
- Cambio rápido de dado, 438
- Canal
 - de alimentación, 243, 261
 - de desahogo de rebaba, 342
- Canales, en la fundición, 298
- Cantidad
 - de materiales, 1144
 - de producción, 1154
 - total de producción, 1064
- Caolinita, 196
- Capa (direccionalidad), 967
 - absorbida, 965
 - Beilby, 964
 - de aislamiento, 844
 - de apresto, 756
 - símbolos, 966
- Capacidades, máquinas herramienta, 638
- Característica, 1024
- Carbonilos, 448
- Carbonitración, 119-120
- Carbono
 - de acero, 103, 137
 - en aceros, 137
 - espumas, 207
 - huella de, 12, 1148
 - nanotubos, 197, 208
 - negro, 183
 - propiedades mecánicas, 138
 - tipo diamante, 209, 1001
- Carburación, 119-120
 - flama, 878
- Carburizado, 219
- Carburos, 197
 - cementados, 605
 - clasificación, 608
 - de micrograno, 606
 - funcionalmente graduados, 606
 - herramientas de corte y, 605
- Carburos no revestidos, 605
- Carburos sinterizados, 605
- Carga
 - dinámica, 74
 - pedras de esmeril, 744
 - Carrera limitada, 356
 - Carrete (cabrestante), 383
 - Carriles guía, máquinas herramienta, 714
 - Cartucho, 429
 - de latón, 157
- Cascarón
 - en la fundición, 239
 - extrusión, 369
 - fresadora, 678
 - rima, 662
- Cascos, compuesto, 225-226
- Caserita, 164
- Casiterita, 163
- Catalizador, polimerización, 172
- Catión, 39
- Catorce puntos de Deming, 1033

- Causa especial, 1039
 Causas comunes, 1039
 Cedencia
 esfuerzo de, 57
 microelectrónica, 835
 resistencia a la, materiales
 diversos, 58
 Celda unitaria, 40
 Célula flexible, 1125
 Celulósicos, 184
 Cementación, 119-120, 988
 Cementita, 108
 Centavos estadounidenses, 16
 Centrado, 744
 cúbico, 40-41, 43
 en el cuerpo
 polímeros, 515
 tetragonal, 112
 vidrio, 486
 Centrifugado, 282
 Centro vivo, 637
 Centros de maquinado
 con husillo vertical, 708
 con husillo horizontal, 708
 EDM para corte de alambre con
 ejes múltiples, 783
 por dado de hundimiento,
 782
 universal, 709
 Cepillado, 684
 Cepillo, 684
 de codo horizontal, 684
 de codo vertical, 684
 Cerámica
 negra, 613
 tradicional, 195
 Cerámicos, 195
 calientes, 480
 características generales, 197
 con base de alúmina, 612
 cuchillos y, 198
 de prensado en caliente, 481
 de prensado en seco, 480
 de secado, 481
 desgaste de, 976
 empaque de, 831
 esmerilables, 201, 482
 en cañones de arma, 203
 en cojinetes, 203
 en máquinas herramienta, 712
 en uniones, 735
 estructura, 195
 fibras de, 220
 finos, 195
 fricción de, 971
 industriales, 195
 maquinables, 201, 482, 594
 moldes de, 459
 prensados en caliente, 613
 prensados en frío, 612
 procesamiento, 475
 propiedades
 físicas, 202
 generales, 200-201
 mecánicas, 200-201
 ópticas, 202
 recubrimientos, 610, 612, 999
 rigidez, 200-201
 verdes, 478
 y hierro fundido, 196, 612
 Ceras, 979
 Cermets, 197, 199, 613
 Cero inventarios, 1131
 Chaflán, herramientas de corte,
 607, 651
 Chalecos antibalas, 225-226
 Chapado electrolítico, 997
 Chip en la placa, 833
 Chips de computadora, 797
 Chiral, nanotubos, 208
 Chispa
 endurecimiento, 988
 sinterizado, 463
 Chispas, rectificado, 741
 Choque,
 mecánico, 588
 térmico, 94
 Chorro de agua
 corte, 397
 disparo, 762
 repujado, 986
 Cianuración, 119-120
 Ciclo biológico, 12
 Ciclo de vida, 7, 1145
 Ciclo industrial, 12
 Cimbales, 431-433
 Circuitos integrados
 tridimensionales, 801
 Cizallado, 387
 dados, 395
 Clasificación y codificación
 sistemas, 1117
 Clip para papel, 47
 Cloruro de polivinilo, 185
 Coalescencia de cavidades, 76
 Cobalto, en carburo de tungsteno,
 605
 Cobertura, 663
 Cobre
 designación, 157
 electrolítico, 157
 método electrolítico, 157
 producción, 156
 propiedades mecánicas, 157
 y aleaciones, 156
 Cocción, 481
 Cocido, con grapas, 951
 Codificación, 1117
 de árbol de decisiones, 1119
 jerárquica, 1118
 KK-3, 1120
 MultiClass, 1120
 Codificador, 1070
 giratorio, 1071
 Código
 G, 1074
 tipo cadena, 1118
 Códigos de barras, 1078
 Coeficiente
 de corte, 578
 de dilatación térmica, diversos
 materiales, 89
 de fricción, 970
 medición, 971
 metales, 970
 Coextrusión, plásticos, 498
 Cojinetes, cerámicos, 203
 Cola
 de paloma, 686
 de pescado, 375
 Colabilidad, 14, 246
 Colapsabilidad, arena, 261
 Colocación, 521
 Colocador, 690-692
 Coloidal, 980
 Coloración, 998
 Colorantes, 182
 Columbium (niobio), 161
 Combadura, 322
 térmica, 322
 Combustión
 en el rectificado, 742
 rociado, 989
 síntesis, 460
 Comercio electrónico, 1113
 Compactación
 de polvos metálicos, 450
 dinámica, 460
 sin presión, 459
 Compactado
 crudo, 451
 hexagonal, 40-41, 43
 Compactos, 614
 Comparador óptico, 1015
 Comparadores, 1015
 Compensación, 58
 Competitividad global, 31
 Comportamiento
 coriáceo, 177-178
 elástico lineal, 57
 parecido al hule, 178
 vídrioso, 177
 Compósito de matriz metálica,
 215, 227
 calibradores de freno, 227
 de granito y epoxi en máquinas
 herramienta, 712
 procesamiento, 527
 Compósitos
 avanzados, 224
 características, 217
 de matriz cerámica, 228
 procesamiento, 527
 de matriz metálica, 227
 en aviones, 216, 229
 en máquinas herramienta, 712
 materiales, 215
 moldes, 257, 284
 procesamiento, 518
 propiedades, 218
 recubrimientos, 612
 resistencia, 223
 Compresión
 ensayo de, 65
 moldeo por, 512, 520
 Compuertas, 243
 en la fundición, 299
 Compuesto
 de moldeo de hojas, 519
 de moldeo grueso, 520
 de moldeo volumétrico, 520
 Compuestos
 intermetálicos, 103
 para moldeo de masa, 520
 Computadora
 control numérico, 25, 1069-1070
 modelado, procesos de fundición
 por, 302
 simulación por, 1113
 visión, 1082
 Comunicaciones
 estándares de, 1134
 red, 1134
 Conductividad
 cerámicos, 202
 eléctrica, 94
 térmica, 93
 materiales diversos, 89-90
 Conductores de electricidad
 adhesivos, 945-946
 cerámicos, 202
 polímeros, 180
 Conductores, 94
 Confiabilidad, 1048
 de circuitos integrados, 835
 del suministro, 14
 de material, 1150
 Conformadora vertical, 684
 Contactos, 829
 Continuidad, 640
 Contornado
 sistema, 1071
 torno, 641
 Contorno
 corte, 689
 formado con rodillos, 407
 Contracción
 ajuste por, 93, 952
 bordeado, 407
 cavidad, 133, 251-252
 fundición, 295
 en el sinterizado, 462
 en la fundición, 248, 262, 297
 en los cerámicos, 481
 holgura, fundición, 297
 huecos, 241
 Contracción por cristalización, 177
 Contracción, solidificación, 249
 Contragolpe, 1073
 Contrapunto, 637
 Control
 adaptativo, 1074
 gráficas, 29, 1043
 límites, 1043
 numérico, 1068
 robots, 1081
 sistemas, 1060
 Control adaptativo, 25, 1074
 de inventarios, 1112
 de lazo abierto, 1070
 de lazo cerrado, 1070
 estadístico de procesos, 29, 1032,
 1040, 1042
 numérico, 25, 1068
 directo, 1069
 distribuido, 1069
 por computadora, 1069-1070
 programación para, 1074
 optimización, 1076
 restricción, 1075
 Controlador adaptativo, 1075
 Controladores lógicos
 programables, 1067
 Controles cableados, 1069
 Copa de vaciado (basin), 243, 261
 Copa, fundición, 243
 Copolímeros, 175
 Coque, 129
 Corazón
 cajas, 263
 horno, 288
 impresiones, 262-263
 taladro, 654
 Corazones, 261-262
 Corindón, 196, 732
 Corona, 322
 Coronilla, 639
 Corredera cruzada, 627, 637
 Corrosión, 95-96, 952
 de cavidad, 96, 952
 de contacto, 975
 galvánica, 96
 Cortado, 968
 longitudinal, 391, 678
 Cortador
 circular, 678
 en forma de piñón, 695
 tipo espiga, 678
 Cortadores
 de árbol, 678
 de cuñeros, 678
 de ranura en T, 678
 Corte, 66
 ángulo
 de, 568
 punzones, 395
 dado, 369
 de desbaste, 631
 deformación, 66
 de, 569
 en la operación de torneado, 626
 oxicomcombustible a gas, 895
 sierras para, 689
 esfuerzo de, 42, 66
 fino, 678
 fluidos para, 617
 efectos, 618
 tiempo de, 720
 módulo de, 66
 oblicuo, 576
 plano de, 568
 rechazado y , 424
 zona de, 568
 Corte (maquinado), 563
 fuerzas, 577
 potencia, 579
 relación de, 569
 temperatura de, 580
 Corto
 circuito en GMAW, 887
 fibras, 221
 rango de congelación, 241
 Costillas, fundición, 296-297
 Costo
 de desperdicio, 1151
 de instalación, 723
 de materiales, 1151
 de procesamiento, 1151
 por volumen, metales, 151
 reducción de, 1160
 total, 31
 unitario
 de forjado, 358-359
 de fundición, 308
 Costos, 31
 de capital, 1159
 de herramientas, 31, 1158
 de mano de obra, 1159-1160
 indirecta, 1160-1161
 de materiales, 1158
 de reparación, 29

- fijos, 31, 1158
generales, 31, 1160
herramientas de corte y, 616
relativos, 1160
- Costra, 250
- Costura(s), 951
bloqueantes, 407
defectos, 382, 965
- Cráteres, 965
- Creación rápida de herramientas, 354, 555
- Crecimiento de cristales, 285, 806
- Cribado, 940
- Criogénico
grabado en seco, 824
maquinado, 622
torneado con diamante, 721
tratamiento, 118
- Crisol, 131
horno, 288
- Cristales, 483
metales y, 40
- Cristalinidad
en los polímeros, 176
grados de, 176
- Cristalitas, 176
- Cromo
carburo, 612
en aceros inoxidable, 142
recubrimiento, 996
- Cuartero, 179
- Cuarto de limpieza, 803
- Cuarzo, 732
- Cuatro rodillos
laminador, 321
molino, 326
- Cúbico centrado en la cara, 40-41, 43
- Cuchilla con filo de diamante, 689
- Cuchillos, 198
- Cuna a cuna, 12, 1146
- Cúpula, 288
- Curado, termofijos, 181
- Curva de distribución normal, 1041
- Curvas de esfuerzo real-deformación real, 62
- Curvas de esfuerzo-deformación, 60
metales diversos, 62
polímeros, 179
- Curvas de vida de las herramientas, 585
- Curvas S-N, 73
- D**
- Dado
cuadrado, 369
de araña, 369-370, 498
de percha recubierta, 498-499
de puente, 370
de regla de acero, 391
deslizante, 405
ojo de buey, 370
- Dados
aceros, 145
corte, 391
costos, 354
en forma de cuña, 379
en V, 405
extrusión, 370
fallas, 355
forjado, 343
fundición o inyección de metales, 278
hinchamiento, 497-498
hundimiento, 354, 677, 776
inserto, 343, 381
materiales, 145, 353
microelectrónica, 829
progresivos, 396
segmentados, 410
- Datos
entrada de, 1070
fusión de, 1137
procesamiento de, 1070
salida de, 1070
- sistema de adquisición de, 1105
- Decapado, 324
- Defecto
de bambú
extrusión de metales 375
extrusión de plásticos, 498
de reventones centrales, 375
lineal, 44
- Defectos, 43, 44, 78, 965
de forjado, 351
de fundición, 249-250
prevención de, 1032
superficiales, 965
trefilado, 382
- Deformación
elástica, 42
logarítmica, 59
monocristales, 42
natural, 59
permanente, 42, 57
plástica, 42, 57, 587
metales policristalinos, 48
superficial, 965
por ablandamiento, 66
por endurecimiento, 45
por envejecimiento, 77, 398
acelerada, 77
real, 59
velocidad, 63-64
endurecimiento, 64
verdadera, 59
- Deformaciones de extensión, 324, 397-398
- Degradación, polímeros, 95, 188
- Delta ferrita, 107
- Deming, W. E., 29, 1032
- Dendrita(s), 239
columnares, 239
multiplicación, 242
tubulares, 242
- Densidad, 89
atómica, 43
de cerámicos, 201
de diversos metales, 89-90
de fibras, 218
de metales en polvo, 453
- Densificación, 466
- Deposición, 807
dual por haz de iones, 992
mejorada por haz de iones, 992
por electrólisis, 448
por vapor, 610, 992
- Dermatitis, 981
- Desajuste, 1021
- Desatendido (sin mando), 1125
- Desbarbado, 389, 761
de energía térmica, 763
robótico, 763
- Desbaste, 591
forja de, 340
- Descarburación, 121, 125
- Descarga eléctrica
rectificado por, 783
- Descascarado (escamación), 975
cerámicos, 202
rodillos, 327
- Descorrimiento, 250
- Desechos, 11
- Desensamble, 10, 1096
- Desensamble, diseño para el, 1096
- Defloculante, 477
- Desgarramiento
de metales laminados, 900
en caliente, 249
en juntas soldadas, 900
- Desgaste, 973-976
abrasivo, 974
adhesivo, 973
corrosivo, 975
de cerámicos, 976
de cráter (craterización), 586
de dos cuerpos, 975
de flanco, 583
de grano por rozamiento (abrasivos), 742
de herramientas de corte, 582-589
- de partículas, 973
- de piedras de esmeril, 742
- de piezas, 973
- de placas, 973
- de plásticos, 976
reforzados, 976
- de tres cuerpos, 975
- erosivo, 975
- permisible de flanco, 586
- plano, rectificado, 740
- por fatiga superficial, 975
- por frotación, 742
- por impacto, 975
- químico, 975
- relación EDM, 781
- resistencia de las herramientas de corte, 601
- suave, 973
- severo, 973
- superficial, 584
permisible, 586
- Designaciones
AISI, aceros, 137, 140
ASTM
para los aceros, 137
tamaño de grano, 46
de aceros, 137
SAE, 137
- Deslaminación, 221
- Deslizamiento
banda, 43
cerámicos, 477
fundición (barbotina), 477
hacia adelante, 319
línea, 43
plano, 42-45
sistemas, 43
- Desoxidación, 252
- Desperdicio, 1153
- Desprendimiento, adhesivos, 947
- Desviación estándar, 29, 1008, 1041
- Desvitrificación, 206
- Detección visual, 1087
- Detención, 426
- Devanado de filamentos, 522
- Diagrama
constitucional, 104
de equilibrio, 104
de fase de carburo de hierro-hierro, 107
de fases binario, 104
- Diagrama de transformación isotérmica, 113
- Diagramas
de formación de límites, 400-401
de transformación tiempo-temperatura, 113
- Diamante policristalino, 614
- Diamante(s), 197, 209, 731-733
- abrasivos, 744
- ensayo de dureza de la pirámide, 69
- herramientas de corte, 614
- industrial, 209, 732
- película, independiente, 1001
- recubrimientos, 612, 1000
- sintéticos, 209
- torneado, 721
- Dibujo, formato de intercambio, 1105
- Difusión, 50, 825
adhesivos, 944
de impulso, 826
en el desgaste por craterización, 586
en el sinterizado, 462
recubrimiento, 993
soldadura fuerte, 938
unión (soldadura), 927
unión, silicio, 851
- Dilatación
proceso para panales, 434
rimas, 662
térmica, 93
coeficiente de materiales diversos, 89-90
- Dimensión
de suma, 1024
funcional, 1024
- Dimensionamiento
geométrico, 1021
pase de trefilado, 380
- Dimensiones límite, 1025
- Direccionalidad de las superficies, 967
- Directrices de diseño profundas, 435
- Discontinuidades, soldadura, 898
- Diseño
asistido por computadora, 8-9, 1105
celular, 1126
de mazarota, 300
de paso de rodillo, 328
experimental, 29, 1034
factorial, 1034
sin papel, 9, 552, 1110
verde, 11, 12, 1146
y manufactura ambientalmente conscientes, 12
- Diseño de unión, 905
pegado adhesivo, 949
soldadura, 943
fuerte, 938
sujeción mecánica, 952
- Diseño para
desensamble, 10, 1096
el medio ambiente, 12
ensamble, 10, 1094
fijación, 1094
formado de hoja metálica, 435
manufactura y ensamble, 10
reciclaje, 12
servicio, 10, 1096
tratamiento térmico, 124-125
- Dislocaciones, 44
- Disolvente, 102
- limpieza, 1003
- resquebrajamiento, 179
- unión, 955
- Disparo
cámara, 279
repujado, 430, 986
soplado, 762
- Dispersión, 1003, 1040-1041
- Disperso, laminación, 323
- Disponibilidad de materiales, 14
- Dispositivo,
cama de clavos, 1090
de microespejo divital, 847
microelectromecánico, 841, 843
microelectrónico, 843
micromecánico, 799, 841, 843
- Dispositivos de sujeción de piezas, 683, 1089
taladrado, 660
torneado, 638
- Dispositivos
de transferencia integral, 1078
semiconductores acelerados para pruebas de vida, 835
- Distanciadore, 429
- Distribución
de frecuencias, 1041
de grupo, 1115
de planta, 1077, 1115
de tamaños de partícula, 450
estadística, 1040
funcional, 1115
- Distribuidor, 134
- Disulfuro de molibdeno, 980
- Divisores, 1011
- Doblado, 67, 402
directrices de diseño, 435
fuerza, 405
tubos y perfiles, 410
- Doble
ángulo, 403
capacidad de, 404
ensayos, 67
holgura, 403
juntas soldadas, 905
longitud, 402
radio, 403

- Dolomita, 129
 Dominio, 1136
 Dopaje, 180, 993
 Dopantes, 95, 286
 Ductilidad, 59
 Dureza, 56, 67
 caliente, 70, 600
 cerámicos, 201
 de Mohs, 70
 gradiente, 121
 penetradores, 68-69
 superficial, 69
 tabla de conversión, 72
 Vickers, 68
 y resistencia, 70-71
 Durómetro, 68, 70
- E**
- Economía**
 ensamble, 1096
 forjado, 358
 formado de hoja metálica, 438
 fundición, 308
 maquinado, 722
 avanzado, 791
 de engranes, 699
 metalurgia de polvos, 469
 procesamiento de compósitos, 530
 rectificado, 764
 soldadura, 928
 unión, 957-958
 EDM sin desgaste, 781
 EFAB, 861
 Efecto
 Bauschinger, 65
 de lavadero, 717
 Hall-Petch, 46
 piezoeléctrico, 95
 Efecto final, 1079
 subordinado, 1080, 1086
 Efectores finales antropomorfos, 1086
 Efectos
 ambientales, 621, 981
 biológicos, fluidos para metalurgia, 981
 de elementos de aleación en los aceros, 136
 de la radiación, 65
 de la gravedad en la fundición, 242
 Eficiencia, soldadura, 883
 ensamble, 1095
 Eje neutro, 403
 Elastómero, 177, 188
 procesamiento, 517
 Electrochapado, 1002
 Electrodeposición, 466, 994
 Electrodeposito, 807
 Electrodo
 de tungsteno, 882
 desgaste EDM, 781
 no consumible, 882
 no desechables, 882
 recubrimientos, 891
 Electrodos, 890
 maquinado avanzado, 781
 Electroerosión
 corte de alambre, 782
 maquinado, 780
 Electroformado, 854, 997
 Electrolito, 775, 780
 Electromigración, 828
 Electropulido, 761
 Electroreostático, 95
 Elementos
 básicos flexibles, 1128
 de rastro, 136
 en acero, 136
 residuales, aceros, 136
 Elongación en el punto de fluencia o cedencia, 324, 398
 Elongación, 58-59, 397
 materiales diversos, 58, 170
 total, 397
 uniforme, 58
 Embutibilidad profunda, 413
- Embutido
 de corte, 684
 de coronilla, 639
 partículas, 415
 profundo, 412
 prensa, 382
 emf, 582
 Empaque, 1062
 Empuje
 brocha de, 686
 corte de, 684
 sistema de, 1131
 Emulsificación, 1003
 Emulsión, 774
 directa, 978
 indirecta, 979
 Emulsiones, 618, 978
 Encamisado (de billet para extrusión en caliente), 371
 Encapsulación, 515
 Enderezado
 de barras, 382
 de láminas, 324
 Endurecimiento
 explosivo, 987
 pasante, 119-120
 por chispa, 988
 por envejecimiento, 118
 superficial, 988
 Energía
 almacenada, 50, 81
 consumo de, 1147
 contenido, en materiales, 1149
 específica, 61
 corte y 579
 rectificado y, 740
 limitada, 356
 Enfriadores, 251, 295
 Enfriamiento
 por rociadura, 286
 templado, 487
 zona de, 239
 Enganches, 753
 en el aserrado, 689
 Engranes
 de generación, 695, 698
 microscópicos, 23
 Engrapado, 951
 Enlace
 covalente, 40, 173
 iónico, 40
 metálico, 40
 primario, 41, 173
 secundario, 40, 173
 Enlaces débiles, 40
 Enlatado (de *billet* para extrusión en caliente), 371
 Enlazamiento iónico, 196
 Enmascaramiento, 771-807
 Enmascarantes, 771-772
 Ennegrecimiento, 998
 Ensamble, 10, 874, 1062, 1090
 aleatorio, 1091
 automatizado, 26, 1091
 diseño para, 1094
 economía, 1096
 eficiencia, 1095
 manual, 1091, 1094
 máquinas herramienta, 714
 mecánico, 950
 robótico, 1095
 selectivo, 1091
 sistemas automatizados, 1091
 Ensayo
 de Charpy, 75
 de disco, 66
 de templabilidad o de extremo templado, 114
 de tensión, 56
 de torsión, 66
 cortante, 904
 en caliente, 350
 de Vickers, 69
 Izod, 75
 Jominy, 114
 Knoop, 69
 Leeb, 68, 70
 waterbreak, 1002
- Ensayos
 adhesivos, 947
 destructivos, 1052
 uniones soldadas, 904
 de dureza, 67, 69
 materiales diversos, 72
versus resistencia, 71
 no destructivos, 1048
 Entrecruzamiento, 175
 Envejecimiento, 118
 acelerado por deformación, 77
 artificial, 118
 natural, 118
 térmico, 178
 Epitaxia por haces moleculares, 808
 Epóxicos, 186
 Ergonomía, 29
 Erosión, 755
 en dados de forjado, 976
 Escalas de dureza, 72
 Escalpo, 684
 Escarpado, 323, 895
 Escisión, polímeros, 182
 Escleroscopio, 70
 Escoria, 129-130, 886
 e inclusiones, 898
 Escoriaciones, desgaste, 973
 Escorias, 245
 Escritura directa, 815
 Escuadra de combinación, 1012
 Esferoidita, 111-112
 Esfuerzo, 57
 agrietamiento por, 79, 81
 blanqueamiento, 180
 cizallamiento crítico, 42
 cortante, 66
 ingeniería, 59
 nominal, 57
 real, 59
 relajación, 74
 relevado de, 79, 122, 902
 verdadero, 59
 Esfuerzos
 cíclicos, 73
 de flexión, 80
 de laminación, 325
 de rectificado, 742
 reducción de, 81
 residuales, 80-81, 965
 soldadura y, 901
 térmicos, 93
 trefilado de barra y, 382
 vidrios y, 487
 Esmaltado, 999
 Esmalte(s), 483, 999, 1002
 Esmeril(es), 196, 732
 de marco oscilante, 753
 de pedestal, 753
 portátiles, 753
 tipo Blanchard, 748
 universales, 748
 Esmerilabilidad, 746
 Especificaciones de intercambio de gráficos, 1105
 Espécimen con muescas, 75
 Esperanza de vida de los productos, 29
 Espesor de viruta sin deformar, 569, 671, 738
 Espiga, 577, 607, 657
 Espinela, 196
 Esqueleto, 1109
 Estabilidad, 1021
 química, herramientas, 601
 Estación
 de comprobación de herramienta, 707
 de verificación de piezas, 707
 Estadística, 1040
 Estado
 blando, 104
 pastoso, 104
 sólido
 formado, plásticos, 516
 soldadura, 876, 912
- Estampado, 386
 en caliente, 427
 lineamientos de diseño, 435
 Estante
 formador, 695
 placas, 995
 Estaño, 163
 Estelita, 605
 Esténcil, 940
 Estereolitografía, 542-543
 Estilete, 968
 Estiramiento, 400
 Estopa, 221
 Estrangulación, 244
 Estriado, 349, 686
 Estrías, 78-79
 Estructura
 aceros de grado, 139
 atómica, metales, 38
 cristalina de los metales, 40
 de abrasivos aglomerados, 737
 de forjado, 316, 323
 de las aleaciones, 104
 de los metales, 38
 de los polímeros, 171
 de los plásticos reforzados, 217
 en capas, 207
 insensible, 44
 moldeo de espuma, 516
 reticulada, 40
 superficial, 964
 Estructuras, cerámicos, 195
 Ethernet, 1134
 Eutectoide, 109, 114
 Evaporación, 808
 Expositivo
 compactación por, 460
 endurecimiento por, 987
 formado por, 428-429
 Exponente de endurecimiento por deformación, 61, 397
 metales diversos, 61
 Extensión
 bordeado, 407
 doblez, 405
 formado, 411
 moldeo por soplado, 509
 Externalización, 31, 1159
 Extrusión, 364-377
 cerámicos, 480
 coaxial, 368
 constante, 367
 defectos, 374-376
 directa, 365-366
 en caliente, 368
 equipos, 376
 estado blando, 284
 fuerza, 367
 hacia adelante, 365
 hidrostática, 366, 374
 impacto, 373
 indirecta, 366
 inversa, 366
 invertida, 366
 lateral, 366
 metales en polvo, 459
 moldeo por soplado, 509
 plásticos, 495
 relación, 366
 Extrusor, 495
 Extrusora recíproca, 503
- F**
- Fabricación
 abajo-arriba, 867
 de forma libre, 536
 de fuelles, 411
 de microchips, 755
 Falla, 75
 Fase(s), 44, 103
 diagramas de, 104-105
 transformación, 111
 Fatiga, 73, 78
 desgaste por, 975
 estática, 201, 489
 falla por, 73
 límite de, 73

- mejora, 78-79
resistencia
 efecto del proceso de
 manufactura a la, 79
 térmica, 93, 588, 975
Feldspato, 196, 735
Fenólico, 182, 186
Fermentación, 188
Ferrimagnetismo, 95
Ferrita, 107
 estabilizador, 109
Ferromagnetismo, 95
Fibra de vidrio, 206
Fibra
 impregnación, 518
 longitud, 220-221
 propiedades, 218
 rayo óptico, 785
 resistencia, 216
 retiro, 221, 976
 tamaño, 220-221
Fibrado, mecánico, 49, 77, 399,
 404
Fibras, 216, 218
 continuas, 217, 221
 cortadas, 221
 de boro, 220
 de grafito conductoras, 220
 de refuerzo, 218
 de vidrio, 219
 discontinuas, 221
 refuerzo con, 218
 Spectra, 220
Fibroso, 76-77
Fijación, 428
Fisuras laminares, 900
Flama
 de corte, 397
 endurecimiento, 119-120
 oxidante, 878
 retardantes de, 182
Flamabilidad, polímeros, 182
Flamas de oxiacetileno, 878
Flauta, 653
Flexibilidad en la manufactura,
 27, 30
Flexión, 67
 de cuatro puntos, 67
 de tres puntos, 67
 libre, 404
Fluidez
 ensayos de, 247
 metal fundido y, 245
Fluido
 dieléctrico, 780
 electrorreológico, 1090
 flujo de, en la fundición, 243
 formado, 419
Fluido magnetorreológico, 1090
Fluidos
 de corte semisintéticos, 618
 sintéticos, 618
 de metalurgia, 977
 inteligentes, 95
Flujo
 de cadenas de valor, 1133
 esfuerzo, 341
 línea, 1063, 1066
 torneado, 424
Fluorocarbonos, 184
Fluoroscopios, 1050
Fondeo, 405
 machuelos, 662
Forjabilidad, 349-350
Forjado, 337, 464
 a tope, 345
 con dado impresor, 342
 de metales en polvo, 458
 de precisión, 344
 defectos del, 351
 economía del, 358
 en caliente, 338
 en dado abierto, 339
 en dado caliente, 348
 en dado cerrado, 344
 en dado plano, 339
 en tibio, 338
fuerza de, 341, 343
giratorio, 349
incremental, 348
isotérmico, 348
laminación, 424
lubricantes de, 353
máquinas de, 355
orbital, 348
radial, 349
sin rebaba, 344
Forma
 casi neta, 23
 de bloque, 410-411
 de corte, 693
 factor de, metales en polvo, 449
 formado, 339, 444
 fundición, 279
 fresado, 677
 herramienta, maquinado
 ultrasónico, 756
 herramientas, 626, 640
 índice de, 449
 intermedia, 352
 laminación de, 323, 328
 manufactura, 23, 236
 neta, 23
 rectificado, 697, 744, 748
Formabilidad, metales laminados,
 399
Formación de cuello, 58, 61, 77
deformación, 62
 metales laminados, 397
Formación de virutas, 588
Formado
 a forma casi neta, 339
 a presión, 386
 asistido electromagnéticamente,
 429
 cerámicos, plásticos, 479
 con dado cóncavo, 343
 con dado convexo, 343
 con macho, 330
 de chispa sumergida, 431
 de hoja metálica, 19, 386
 equipos, 438
 procesos, 19
 de metal semisólido, 242, 282-
 284
 electrohidráulico, 431
 hidroplástico, 479
 incremental, 425
 moldeado de cerámicos, 490
 neto por ingeniería láser, 551
 por descarga eléctrica, 431
 por pulsos magnéticos, 429
 procesos, 313-314
 superplástico, 64, 426, 927
Formas comercialmente disponibles,
 1149
Formato, 387
 diseño, 434
Formato de archivo STL, 1106
Fosa de recalentamiento (empape),
 132
Fosfato
 recubrimiento de, 998
 recubrimientos de conversión,
 372, 980
Fotografado, 774
Fotopolímero, 543
Fotorresistencia, 774
Fracción del peso, 105
Fractura, 75
 de aglomerante, rectificado, 743
 de copa y cono, 76
 de granos abrasivos, 743
 de herramientas de corte, 588
 de plásticos reforzados, 222
 de punta de flecha, 375
 dúctil, 76
 ensayo de tenacidad, juntas
 soldadas, 905
 esfuerzo de, 58
 frágil, 77
 intergranular, 78
 superficies de, 76, 78-79
 transgranular, 78
Fragilización, 47
 por hidrógeno, 79
Freno
 calibradores del, 227
 maquinado de discos de, 635
Frente duro, 988
Fresa
 afiladoras, 323
 de nariz de bola, 677
 final, 676
 frontal hueca, 677
 generadora o generatriz, 695
 Z, 321, 326
Fresado, 669
 bifurcado, 677
 cerámicos, 477
 convencional, 669-670, 671, 673
 cortadores, 669
 de superficie, 566, 669
 descendente, 670
 escalado, 669-671, 673
 final, 566, 676
 frontal, 673
 fuerzas de, 672, 676
 máquinas de, 682
 par de torsión, 672, 676
 plano, 669
 periférico, 669
 químico, 771
Fresadoras
 de columna y rodilla universales,
 682
 de tipo cepillo, 682
 longitudinales, o de bancada, 682
Friabilidad, 731, 743
Fricción, 969
 ángulo, corte, 570, 578
 aserrado, 397, 690
 de soldadura, 915
 en los cerámicos, 971
 en los metales, 969
 en los plásticos, 970
 fuerza, 970
 inercia, 916
 lineal, 916
 medición, 971
 pérdida, fundición, 243
 pico de, 341
 pistones, 929-930
 reducción, 971
 soldadura por agitación, 916
Fricción estática, 845
Frío
 agrietamiento por, soldaduras,
 900
 cerrado, 249
 extrusión, 365, 372
 forjado, 338
 formado con rodillos, 407
 formado, plásticos, 516
 laminación, 324
 prensado isostático, 454
 sierras, 689
 soldadura, 913
 trabajo, 48, 50
Frontera
 de lubricación, 977
 representación, 1106
Fuente de lápiz, 815
Fuera
 de control, 1044
 de redondez, 1014
Fuerza
 de corte, 577-578, 630
 de forjado, 341
 de fresado, 672
 de laminación, 319
 de punzonado, 390
 de sujeción ajustable, 1090
 de trefilado, 378
 en taladrado, 656
 específica, 90
 materiales diversos, 90-91
 versus temperatura, 92
 profunda, 412
 radial, 630
 resultante, 577
 verde, 462
Fuga de estaño, 43
Fullerenos, 208
Funciones
 de ejecución de negocios, 1103
 de planeación de negocios, 1103
Fundente, 129, 287, 879, 936, 939
granular, 886
Fundición, 235, 237
aleaciones, 303-305
 a base de cobre, 303
 a base de estaño, 303
 a base de zinc, 303
 características, 257-259
 cerámicos, 477
 centrífuga, 281, 282
 verdadera, 281
 con modelo desechable, 269-270
 continua, 133-134
 de cristal, 285
 de drenado, 477
 de eyectores (expulsores),
 278-279, 283
 de flujo laminar, 245
 de lingotes, 132
 de modelo perdido, 269
 de molde duro, 276
 de monocristales, 284-285
 defectos, 249-250
 de tiras, 135
 en molde de yeso, 267
 en molde semipermanente, 276
 en serie, 133
 economía, 308
 plásticos, 514
 por dado impresor, 282
 por embutido, 252
 por revestimiento con cáscara
 cerámica, 273
 por revestimiento, 271-272
 prótesis totales de rodilla, 274-
 276
 proceso, 17
 semicentrífuga, 282
 tixotrópica, 242-243, 284
 vaciado, de lingotes, 132
Fundiciones
 en automóviles, 236
 inspección, 287
Fundidoras, 289
Fusión, 157, 953
 caliente reactiva, 944
 características, 877
 de levitación, 288
 incompleta, 898
 juntas soldadas, 896
 práctica, 287
 punto de, 92
 materiales diversos, 89-90
 soldadura, 875, 877
 temperatura, polímeros, 178
G
Galena, 163
Galvanización, 163, 999
Ganancia, 968
Gas
 adsorbido, 964
 atomización, 446
 combustible, 877
 de oxcombustible
 corte, 895
 soldadura, 877
 soldadura de arco de gas metálico,
 887
 soldadura de arco de gas
 tungsteno, 884
Gas combustible, 877
Gases en la fundición, 251
Gaussiano, 1041
Geometría
 de indentación, 70
 sólida constructiva, 1106
Giro
 ángulo, 66
 taladro, 653
GLARE, 216, 229-230
Goodyear, C., 189
Gotas, vidrio, 485

- Grabado
anisotrópico, 821
catódico, 822
de silicio reactivo y metalización, 850
físico-químico, 823
húmedo, 773
isotrópico, 46, 819
posterior, 821
preferencial, 774
profundo por iones reactivos, 823, 851
térmico, fundición, 241
vertical, 821
- Gradientes térmicos, 42
- Grado
de cristalinidad, 175-177
de polimerización, 173
- Grafeno, 209
- Gráficas de control de Shewhart, 1042
- Gráficos de computadora interactivos, 1105
- Grafitización, 110
- Grafito, 197, 207
espumas, 207
fibras, 207, 220
producción, 502
lubricante, 979
- Gran promedio, 1043
- Granalla, bombardeo con perdigones, 430, 986
- Granallado por gravedad, 986
- Granate, 732
- Granos, 45
columnares, 239, 285, 896
crecimiento, 49
metales laminados, 399
tamaño, 46
estructura, fundición, 285
equiaxiales, 48, 239
finales, 351
fractura, abrasivos aglomerados, 743
fuerza, rectificado, 739
límite
deslizamiento, 47, 74
fragilización, 47
límites, 44, 47
número, 46
patrón de flujo, 347, 351
profundidad de corte, 738
- Grasas, 979
- Gravedad
específica, 89
forjado, 357
martillo, 357
- Grietas, 44, 965
de cremallera, 325
- Gripado (amarramiento), 372, 973
- Grupo
células de máquinas, 1125
diseño celular en, 1126
distribución en, 1115
tecnología de, 26, 1114-1121
- Guías, máquinas herramienta, 627, 637, 640
- Gusanos, 397
- H**
- Hacia atrás
extrusión, 366
rechazado, 425
- Hasta el fresado, 670
- Hastelloy, 158
- Haz de electrones
corte, 895
deposición, 991
endurecimiento, 121
fusión, 545
litografía, 810, 815
maquinado, 787
soldadura con, 892
- Hechura de orificios, 950
- Hematita, 129
- Herramienta y cortador de esmeril universal, 753
- Herramienta(s)
aceros, 144, 604
al final del brazo, 1079
almacenamiento, 706
costos de, 616
de aleación de cobalto fundido, 605
de contacto controladas, 574
de corte de nanomateriales, 616
de corte reforzadas con triquitas, 615
de Internet, 1134
de rociado de metal, 557
desgaste, 582-589
EDM, 781
medición, 589
materiales,
características, 602-603
cizallamiento, 396
de corte, 600
post, 637
profundidad, maquinado por láser, 785
recondicionamiento, 616
torneado, 636
abrasivo, 753
tronzado, 566
- Heurística, 1136
- HEXSIL, 858
- Híbridos
codificación, 1118
cojinetes, 203
sistemas de maquinado, 790
- Hidrometalurgia, 157
- Hidroplasticidad, 196
- Hidrorrechazado, 424
- Hierro, 129
cochino, arrabio, 130
de grafito compactado, 111, 307
dúctil, 111, 307
fundido blanco, 111, 307
fundido gris
ferrítico, 110, 307
martensítico, 110, 307
perlítico, 110, 307
gamma, 107
maleable, 111, 307
nodular, 111, 307
- Hierros fundidos, 109, 306, 307
- Higroscópico(s), 180, 185, 220
- Hilabilidad, 425
- Hilado
en gel, 502
en húmedo, 502
en seco, 502
fibras de polímero, 501-502
fundido, 286, 501
vidrio, 486
- Hilador, 501
- Hilvanado, 410
- Histéresis, elastómeros, 189
- Historia
de la automatización, 1061
de la manufactura, 1, 3-5
- Hoja
de extrusión, polímeros, 498-499
metálica, 318, 386
características, 397
formado, 19, 386
formabilidad, 399
- Hoja de ruta, 1111
- Hojalata, 163
- Hojas de operación (enrutamiento), 1111
- Hojuelas, 217
- Holgura, 388, 1024
ajuste, 1024
ángulo, 568
de contracción del fabricante de modelos, 297
en la soldadura fuerte, 937
- Holografía, 1051
acústica de superficie líquida, 1052
de escaneado acústico, 1052
- Holón de recursos, 1130
- Homopolímero, 175
- Horadaciones, en la fractura dúctil, 76
- Horadado, penetrado, abocinado, 409
- Horno
continuo, 123
de arco directo, 131
de arco eléctrico, 287
de arco indirecto, 131
de caja, 123
de campana, 123
de canal, 288
de hogar abierto, 130
de inducción sin núcleo, 288
de oxígeno básico, 130-131
de pozo, 123
eléctrico, 130
elevador, 123
en baño de sal, 124
lote de, 123
- Hornos
de fusión, 130, 287
atmósfera, 124
tratamiento térmico, 123
- Hueco
fundición en, 248, 277
moldeo en, 511
- Huecos, 241
moldeo por inyección, 507
- Hule
formado, 419
natural, 189
pegado, 737
polímeros modificados, 178
- Hules, 189
sintéticos, 189
- Humedad
efecto en los polímeros, 180
en los cerámicos, 481
- Husillo, 627
- I**
- Identificación, valor, 1132
- IGES, 1105
- Ilustraciones, 774
- Impacto, 74
desgaste, 976
ensayos, 75
extrusión, 373
forjado, 464
moldeo, 264
resistencia, 601
revestimiento, 987
tenacidad, 75
- Imperfecciones, 43
en los cristales, 967
- Implantación
de iones, 612, 825-826, 993
de iones de nitrógeno, 612
de iones de Zenón, 612
- Implante biomédico, 778
- Impregnación, 465
- Impresión tridimensional, 546
- Impurezas, 44
- Inclinación, en la laminación, 319
- Inclusiones, 44, 246, 250, 965
efecto sobre las propiedades, 76-77
flexión, 407
papel en la fractura, 83
soldadura, 898
- Incoloy, 159
- Inconel, 158
- Indexación, 1092
portaherramienta, 606
- Indexación en línea, 1092
- Indexación giratoria, 1092
- Inducción
calentamiento, 124
endurecimiento, 119-120
horno, 131, 288
soldadura, 922
fuerte, 937
- Inferencia, 1136
- Infiltración, 466
de vapor, 528
- Inflamamiento, dado, 497-498
- Infraestructura digital, sistemas expertos, 1136
- Ingeniería
asistida por computadora, 8-9, 1105
cerámicos, 195
concurrente, 8
de Factores Humanos, 29
deformación, 57
del ciclo de vida, 9
del conocimiento, 1135
esfuerzo, 57
materiales, 368
metrología, 100
simultánea, 7, 10
verde, 1146
- Inmersión
en caliente, 998
moldeo, 517
soldadura fuerte, 938
- Inoculante, 242
- Insertos, 576
dado de forjado, 343
herramientas de corte, 606
- Inspección
automatizada, 1020, 1052-1053
en el proceso, 1008, 1053
en línea, 1008, 1053
en tiempo real, 1008
en fundiciones, 287
no destructiva de adhesivos, 947
por corrientes de Eddy, 1051
postproceso, 1008, 1052
térmica, 1051
termográfica, 1051
termométrica, 1051
ultrafónica, 1049
- Instrumentos
de medición tipo desviación, 1012
digitales, 1010
graduados en línea, 1010
- Integración
a escala de pastilla, 801
a escala muy grande, 800
- Integrada superficial, 589, 965
- Inteligencia artificial, 27, 1135-1138
redes neuronales, 27, 1137
- Intercambiable, 1022
- Intercambio de dados en un solo minuto (SMED), 438
- Interferencia, 1025
ajuste, 1025
franja, 1014
- Interferometría, 1013
holográfica, 1051
- Intermedios, vidrios, 205
- Interpolación, 1072
circular, 1072
cúbica, 1072
lineal, 1072
parabólica, 1072
- Intersticial, átomo, 44
- Invar, 94, 158
- Inventario, 1131
- Inyección
moldeo
cerámicos, 480
máquinas, 507
metales en polvo, 457
plásticos, 502
por soplado, 509
refinación, 133
- J**
- Jabones, 979
- Jale, 1133
brocha de, 686
- Juran, J. M., 29, 1033
- Justo a tiempo, 26, 1124, 1131
- K**
- Kaikaku, 1134
- Kaizen, 1030, 1145
- Kanban, 1132

- Kerf, abertura o ranura de corte, 688, 783, 785, 787, 895
 Kevlar, 220
 Kovar, 158
- L**
 Lacas, 1002
 Lagartismo, 325
 Laminación, 217
 cruzada, 328
 de tubos y tubería sin costuras, 332
 en caliente, 316, 323
 en grupo, 327
 estructuras, 518
 interna de roscas, 330
 manufactura de objetos, 551
 metales, 316
 múltiple, 324
 molinos, 326
 oblicua, 329
 polvo de metal, 459
 Steckel, 322
 superficial, 987
 vidrio, 484, 487
- Lanza, 131
 Lanzado, 391
 Lanzadores de arena, 264
 Lapeado, 758
 engranes, 698
- Largo
 de fibras, 221
 rango de congelación, 241
- Láser
 de corte, 23
 formado, 431
 GMAW, 894
 interferometría, 1018
 microjet, 786
 micrómetro, 1018
 repujado, 986
 revestimiento, 988
 tipos, 784
 tratamiento superficial, 993
- Latas
 de estaño, 163
 fabricación, 413-418
- Látex, 189, 517
- Latón, 156
 naval, 157
 propiedades mecánicas, 157
 rojo, 157
- Lavado, 250
- Lecho fluidizado, 124
- Lectura completa del indicador, 1014
- Lehr, 483
- Letreros, en fundiciones, 297
- Levanteador de válvula, 456
- Ley de Hooke, 59
- Ley de Moore, 816
- Libre comercio, 1060
- LIGA, 854
- Limado giratorio, 692
- Limas, tipo de disco, 692
- Límite
 de control superior, 1044
 de especificación inferior, 1036
 de especificación superior, 1036
 de resistencia, 73
 vs resistencia a la tensión, 74
 proporcional, 57
- Límites, 1025
 de control inferior, 1044
 de especificación, 1036
- Limonita, 129
- Limpieza, 1002, 1003
 electrolítica, 1003
 fluidos para, 1003
 mecánica, 1003
 procesos de, 1002
 ultrasónica, 1003
- Línea
 anchura de, 813
 cero, 1027
 de congelación, 500
 de enlace, 104
 de profundidad de corte, 587
 de referencia, 1024
 representación de, 1106
- Linealidad, 1021
- Líneas
 de arrastre, 895
 de manufactura especializadas, 704
 flexibles, 1063
- Líquidos
 fase, 105
 penetrantes, 1048
- Liquidus, 104
- Lista de materiales, 1112
- Lixiviación, 96
 selectiva, 96, 979
- Llama neutra, 878
- Llenado insuficiente, 899
- Lógica difusa, 1137
- Longitud de viruta sin deformar, 738
- Longitud, 1008
- Lote pequeño, 24, 1065, 1160
- Lubricación, 976
 de cantidad mínima, 621
 de película delgada, 977
 de película gruesa, 977
 extrusión, 372
 límite, 977
 mixta, 977
 película delgada, 977
 regímenes, 977
- Lubricación mixta, 977
- Lubricante, 977
 rompimiento, 977
 selección, 980
- Lubricantes, 617
 a base de agua, 978
 en los polímeros, 182
 forjado, 353
 mezcla de polvos metálicos, 450
- M**
 Machos autorreversibles, 663
- Machuelado, 662
 sin virutas, 663
- Machuelo(s), 662
 para formado, 330
 plegables, 662
- Maclado, 43
- Macromanufactura, 797
- Macromoléculas, 169
- Macrosegregación, 242
- Magnesio y aleaciones de, 155, 303
 designación, 155
 producción, 156
 propiedades mecánicas, 155
- Magnetorreostático, 95
- Magnetostricción, 95
- Magnificación, 1021
- Mamelón, 251
- Mandíbulas suaves, 638
- Mandril, 369, 380, 410, 424, 639, 997, 1089
 flotante, 380
 múltiple, 639
- Mandrinado, 626, 640, 651
 barra, 651
 fresas, 651
 máquinas, 651
- Mandradora vertical, 651
- Manejo automatizado de materiales, 26
- Manguito, 627, 637
- Manipulación automática, 1060
- Manipulador, 1077, 1079
- Mano de obra
 costos de, 31, 1159-1160
 directa, 31
 costos de, 1159-1160
 improductiva, 31, 1160
 indirecta, 31
 intensiva, 1064
- Mantenimiento productivo total, 1068
- Manufactura, 1
 a nanoescala, 842
 ágil, 30
 asistida por computadora, 8, 10, 1110
 atributos, 1117
 características de los materiales, 1150
 celular, 26, 1063, 1125
 costos, 31, 1160
 de arriba a abajo, 866
 de botellas, 485
 de plásticos, 509
 de clase mundial, 31, 1141
 de engranes
 corte de forma, 693
 dientes, medición, 1015
 generación, 695
 laminado, 697
 talladora, 695
 de escritorio, 536
 de panal, 433-434
 de partículas balísticas, 547
 digital, 6, 526, 1064
 directa, 553
 esbelta, 1132-1134
 flexible, 1125
 historia, 1, 3-5
 holónica, 1129-1131
 integrada por computadora, 8-9, 25, 1102
 planeación de recursos, 1112
 procesos, 16
 capacidades, 1153
 selección, 16-17
 propiedades, 14
 redes de comunicaciones, 1134
 sistemas, 1102
 sostenible, 1146
 tendencias, 32
 verde, 12
- Máquina
 de barra de husillo automático, 641
 de cuatro correderas, 406
 de medición coordinada, 1018
 herramienta, estructuras de, 712
 rimas, 661
 tipo columna y rodilla, 681
 visión, 1078, 1987, 1137
- Máquina de fresado longitudinal (de bancada) giratoria, 682
- Maquinabilidad, 14, 591
 clasificaciones, 591
 materiales diversos, 591
- Maquinado, 563, 625, 668
 a muy alta velocidad, 719
 asistido térmicamente, 594
 avanzado, 769
 casi en seco, 621
 centros, 703, 705
 con alta tasa de remoción, 645
 costo, 723
 de acabado, 591
 de alta dureza 720
 de electrodescarga, 780
 de ultra alta velocidad, 719
 economía, 722
 electrofítico de forma tubular, 776
 electroquímico, 775
 en caliente, 594
 en seco, 621
 fotoquímico, 774
 hidrodinámico, 788
 holgura, 300
 no convencional, 770
 no tradicional, 770
 por chorro abrasivo, 790
 por electroerosión, 780
 por flujo abrasivo, 763
 por flujo microabrasivo, 763
 procesos, 21
 químico, 770
 ultrasónico, 755, 756
- Máquinas
 automáticas de barra con husillos múltiples, 641
 autorreplicantes, 552
 de barra, automáticas, 641
 de colocación de cinta, 518
 de forjado con alta tasa de energía, 357
 de taladrado universal, 659
 especializadas, 1065, 1160
 herramienta, 625, 668, 703, 713, 729, 769
 lineales, 714
 hexápodos, 715
 independientes, 1062, 1064
 mandrinadoras horizontales, 651
 reconfigurables, 711
- Marca de hundimiento, 507, 529
- Marcado, 345
 por rayos láser, 785
- Marcas de playa, 78-79
- Marcos para gafas de sol, 27
- Martempleado modificado, 123
- Martensita, 112
- Martensíticos, 119
- Martillo
 de contragolpe, 357
 de gravedad, 357
- Martillos, forjado de, 356
- Martinete (ariete)
 extrusión, 366
 máquinas de forjado, 355
- Masa
 continuidad, 244
 producción, 6, 24, 1065
- Máscara, 810
- Masticado, 517
- Materia prima, polvos metálicos, 451
- Material, 36
 costo de, 31, 1158
 manejo de, 1062, 1077
 manipulación del, 26
 movimiento de, 1077
 selección, 13, 35-36
 sustitución, 15, 1151-1152
 tasa de eliminación
 electroerosión o maquinado por descarga eléctrica, 780
 fresado, 671
 maquinado electroquímico, 775
 perforación, 656
 rectificado por descarga eléctrica, 783
 torneado, 629-630
- Materiales
 de ingeniería, 2, 222, 518
 de punzones y dados, 144, 461
 en cambio de fase, 1090
 ensayos, frágiles, 66
 inteligentes, 95, 164
 nanocristalinos, 210
 nanoestructurados, 210
 para herramientas de corte, 600
 para monedas, 97
- Matriz, 216
 materiales, 221
- Mats, 221
- Mazarota abierta, 261
- Mazarotas, 243, 261
- Mecanización, 6, 1060
- Media aritmética, 967, 1041
- Media tuerca, 649
- Medición
 automatizada, 1020
 características de los instrumentos, 1021
 de la longitud comparativa, 1012
 de la posición, 1073
 de longitud digital fotoeléctrica, 1018
 directa, 1070
 indirecta, 1070
 máquinas, 1018
- Medidor, 1009
- Medidores
 electrónicos, 1017
 exteriores, 1016
- Medio
 lotes, 1160
 temperatura CVD, 993
- Mejora continua, 1030, 1032, 1141, 1145

- Melamina, 186
 Memoria de forma
 aleaciones con, 164, 952
 polímeros con, 181
 Mesa de trabajo, 681
 Mesomanufactura, 798
 Metaestable, 110
 Metal caliente, 130
 Metal
 costura, 951
 espumas, 165
 líquido
 epitaxia, 808
 forjado, 282
 fragilización, 47
 procesamiento, 527
 sinterizado, 463
 patrón de flujo, extrusión, 368
 polvos, 445
 distribución del tamaño de partícula, 450
 forma de la partícula, 449
 producción, 445
 tamaño de la partícula, 449
 rellenos, 295
 revestimiento, 381
 rociado de polvo, 989
 soldadura por gas inerte, 887
 unión, 737
 Metales
 hierro fundido, 163
 ligeros, 303
 no ferrosos, 150-151
 fundición, 303
 nobles, 164
 para soldadura blanda, 163, 939
 preciosos, 164
 puros, 102
 refractarios y aleaciones, 161
 Metalización, circuitos integrados, 828
 Metalizado, 988
 Metalografía, 965
 Metalurgia de cuchara u olla, 133
 Método
 de atributos, 1040
 de jalado de cristales, 286
 de reducción térmica, 156
 de variables, 1040
 de zona flotante, 286
 electrolítico, 156
 Metrología, 1008
 Mezcla, polvos metálicos, 450
 Mezclas
 miscibles, 178
 polímeros, 177
 Microchip, 974
 Microdureza, 69
 Microestereolitografía, 544
 Microformado, 431
 Microjet, 786
 Micromanufactura, 797
 Micrómetro, 1011
 calibre de profundidad, 1011
 digital, 847
 escaneo láser, 1018
 Micromoldeado en capilares, 817
 Microporosidad, 153
 Microrreplicación, 757
 Microscopio
 de energía atómica, 969
 de interferencia óptica, 969
 del fabricante de herramientas, 589
 Microscopios, 1018
 Microsegregación, 242
 Microsoldaduras, 970
 MIMIC, 817
 Miniaceras, 328
 Modelado
 geométrico, 1106
 MultiJet, 544
 por deposición, 540
 Modelando, 1106
 fundición, 244
 Modelo
 de bola dura, 41
 de placa bipartida, 262
 de una sola pieza, 262
 Merchant, 567
 paramétrico, 1107
 superficial, 1106
 Modelos
 de cera, 272
 estándar de datos para el intercambio de productos, 1105
 fundición, 262
 Modificadores, vidrio, 205
 Modulación, 705, 711
 Modular, 1066
 construcción, 711
 fijación, 1089
 Módulo
 de elasticidad, 59
 de polímeros, 170
 materiales diversos, 58
 de resiliencia, 71
 de rigidez, 66
 de ruptura, 67
 elástico, 59
 materiales diversos, 58
 Molde, 238
 ablación, 266
 de canal caliente, 505
 de canal frío, 505
 de dos placas, 505
 de tres placas, 505
 diseño, fundición, 300
 inferior, 261
 lavado, 245
 sin canales, 505
 sin hornear, 261
 superior, 261
 Moldeado
 con bolsa al vacío, 520
 de colocación manual, 521
 de espuma, 515
 de espuma de poliuretano, 516
 de grafito apisonado, 266
 en caja fría, 261
 en cascarón, 266-267
 en hielo, 506
 por coinyección, 505
 por contacto, 521
 por hundimiento, 486
 por inserción, 280, 505
 por inyección de acetal epoxy transparente sólido, 557
 por inyección de componentes múltiples, 505
 por inyección de metal, 457
 por microtransferencia, 817
 por transferencia/inyección, 522
 rotacional, 509-510
 sándwich, 505
 sin caja vertical, 263
 Moldes, 243
 de piel seca, 261
 desechables, 257
 fundición, 257
 permanentes, 257
 Molécula, 40
 Moléculas
 de cadena larga, 171
 gigantes, 169, 181, 189
 Moleteado, 626, 640
 Molibdeno, 161
 Molino
 de conjunto o racimo, 321, 326
 de desbaste, 325
 de dos rodillos, 325
 de laminación con dos rodillos, 321
 laminación, 326
 Pilger, 333
 planetario, 321
 reversible, 321, 325
 Sendzimir, 321, 326
 Molinos integrados, 328
 MolTun, 859
 Monedas, 913
 Monel, 158
 Monocódigo, 1118
 Monómero, 171
 Montaje superficial, 832
 Mordaza, 638
 de cuatro quijadas, 638
 de tres mandíbulas, 638
 Motor a reacción, 152
 Motores de movimiento lineal, 714
 Movimiento
 de dislocación, 45
 de indicador, completo, 1014
 MTConnect, 1135
 Muesca
 desgaste, 587
 sensibilidad, 75
 Muescado, 391
 Muestreo aleatorio, 1040
 Mulita, 196
 Multicapa
 moldeo por soplado, 509
 N
 Náilon, 185
 Nanocerámicos, 199
 Nanoesmerilado, 856
 Nanofase, 210
 cerámicos, 197, 199, 481
 Nanomateriales, 210
 riesgos para la salud, 211
 Nanopolvos, 449
 Nanotubos, 208
 de pared múltiple, 208
 de pared sencilla, 208
 Nariz
 desgaste de, 587
 radio de, 577, 629
 Negro de humo, 207
 Neuronas, 1137
 Nextel, 220
 Nibleado, 392
 Nicromo, 158
 Niebla, 618
 Nimónico, 159
 Niobio (columbio), 161
 Níquel y sus aleaciones, 158
 Nitinol, 164
 Nitruración, 119-120
 Nitruro
 de boro cúbico, 197-198, 613, 731-733
 de hafnio, 612
 de titanio-aluminio, 612
 de zirconio, 612
 Nitruros, 197-198, 614
 Norma ISO 9000, 1038
 Norma ISO 14000, 1039
 Norma QS 9000, 1039
 Normalización, 121
 Nucleación, 45-46, 242
 heterogénea, 242
 homogénea, 239
 Número de Reynolds, 245
 O
 Ondulación, 967
 Ondulaciones, 80
 Opitz, H., 1119
 Optimización, control adaptativo, 1076
 Orden holón, 1130
 Orientación, 625
 grabado dependiente, 821
 polímeros, 179
 preferida, 49
 Orificio
 ciego, 652
 hechura, 652
 mazarota, 261
 preparación, 950
 Orificios de soplado, 133
 Oro, 164
 relleno, 926
 Oscilación, 638
 Oxidación, 96, 809
 anódica, 998
 desgaste, 975
 húmeda, 809
 seca, 809
 Oxidación selectiva, 809
 Óxido
 cerámicos de, 196-197
 de entrada, 809
 de zirconio, 616
 películas de, 964
 Oxígeno, fragilización por, 79
 P
 Palanquilla, 317, 323
 Paletas, 497
 Palo de golf, 690-692
 Pancaking, 339
 Pandeo, 75
 Pantalla indicadora, 1012-1013
 Paño
 de esmeril, 729, 756
 de purga, 521
 Papel
 de aluminio, 318
 lija, 729, 756
 Par de torsión, torque
 en fresado, 672
 en laminación, 319
 en perforado, 656
 Parison, 509
 Parsons, J. T., 1069
 Partículas
 dispersas, 104
 en segunda fase, 104
 Pasivación, 96, 142, 965
 Paso
 a paso, 811
 en brochas, 684-685
 y exploración, 811
 Picaduras, 965
 Pastilla, 381
 Patentamiento, 380
 Patrón
 de prueba, 829
 modelo cónico, 262
 reconocimiento, 1082
 Pavonado (azulado), 124
 Pederal, 196
 Película
 de diamante, independiente, 1001
 deposición, 808
 extrusión, 499
 soplada, 500
 Películas
 conductoras, 807
 metálicas, 980
 poliméricas, 980
 sopladas, 500
 Pellets, gránulos, 501
 Peltre, 164
 Penetración (arado), 970
 en el rectificado, 740
 incompleta, 898
 Penetrado, 347
 Penetradores, 68-69
 Penetrantes
 fluorescentes, 1048
 líquidos, 1048
 visibles, 1048
 Pepita, soldadura, 919
 Pérdida
 costo, 1036
 de calidad, 1034
 Perfección, 1134
 Perfil
 fresadora, 682
 medición, 1014
 trefilado, 381
 Perfiles superficiales, 968
 Perfilómetro, 967
 superficial, 968
 Perforación, 391
 de lámina metálica, 409
 de tubos, 332
 Perlita, 109, 111
 fina, 111
 gruesa, 111
 Permeabilidad, arena, 260
 Perno de arrastre, 950
 Pernos (arcos) soldadura, 924
 Peso molecular, polímeros, 172-173
 Pianola, 1069
 Picado, 96, 975
 datos de forjado, 976

- Piedra (de esmeril)
caliza, 129
de actuación dura, 743
grado de 737
profundidad de corte, 738
suave de actuación, 743
- Piedras
de corte libre, 742
montadas, 734
orgánicas, 736
rectificado, 758
- Piel
de naranja, 46, 50, 399
de tiburón, efectos, 498
fundición, 239
laminación de temple o de, 398
pase, 324
- Pieza(s)
alimentadores de, 1092
en bruto, soldadas a la medida, 393
familias de, 1114
intercambiables, 6
programación de, 1074
soplador de nieve, 470
- Pigmentos, polímeros, 182
- Pimentero, 24-25
- Pintura(s), 1001-1002
a base de agua, 1002
- Pinza de salida, 639
- Pirocerámica, 206
- Pirofórico, 155, 449
- Pirólisis, 219, 502
- Pirometalurgia, 157
- Pisador, 412
- Pistola
barriles, cerámicos, 203
de detonación, 989
taladrado, 655
trepanado, 655
- Pistón de monoacero, 929
- Placa
de vidrio, 483
de volante, 925
frontal, 639
metálica, 317
óptica, 1013
superficial, 1012
- Plancha, 317, 323
- Planchado, 413, 416
- Planeación
de la capacidad, 1112
de procesos asistida por computadora, 8, 26, 1111
de recursos empresariales, 1112
de requerimientos de materiales, 1112
- Planitud, 1013
- Plano
áreas, fundición, 296
basal, 41
de maclado, 43
de separación, 77
deposición de metal con alambre, 541
laminación, 318
- Plantilla, 641, 694, 1089
- Plasma, 989
arco de
corte, 788, 895
soldadura, 884
grabado, 823
haces, 788
- Plásticos, 169
biodegradables, 187
conductores, 180
desgaste, 976
estructura, 171
fricción, 970
maquinado, 594
para revestimientos, 1000
procesamiento, 494
reforzados, 216
aplicaciones, 224
módulo elástico, 223
procesamiento, 518
propiedades, 221
resistencia, 223
- termofijos, 181
unión, 953
- Plastificantes, 182
cerámicos, 477
- Plastisoles, 511
- Plata de ley, 164
- Plataforma Stewart, 715
- Platino, 164
- Platos, 641
- Plegado, 951
- Pliegues, 965
- Plomo, 163
aceros libres de, 592
aleaciones basadas en, fundición, 303
soldaduras libres de, 163, 939
vidrio álcali, 205
- Población, 1040
- Poka-yoke, 1095
- Polaridad directa, soldadura de arco, 882
- Poliámidas, 184
- Policarbonatos, 185
- Policódigos, 1118
- Policristales, 50
- Poliésteres, 185-186
- Poliestirenos, 185
- Poliétilenos, 185
- Poligonización, 49
- Poliimidas, 185-186
- Polimerización, 171-172
grado de, 173
por adición, 172
por condensación, 172
por crecimiento en cadena, 172
por crecimiento en etapas, 172
por reacción en cadena, 172
por reacción en etapas, 172
- Polímero
compósitos con matriz de, 215-216
concreto polimérico en máquinas herramienta, 713
fibras de, 221
medios de temple, 117
precursor, 528
procesamiento, 20
- Polímeros, 169, 172
conductores, 180
en red, 174-175
entrecruzados, 174
estructura, 171
lineales, 174
orgánicos sintéticos, 171
producción de fibras, 501
ramificados, 174
sistema de base láctica, 188
térmicamente conductores, 181
- Polimezclas, 178
- Polimorfismo, 41
- Polipropilenos, 185
- Polisulfonas, 185
- Poliuretano, 189
- Polvo
en tubo, 490
forjado, 458
laminación, 459
metalurgia, 444
equipos, 454
moldeo por inyección, 457
- Polvos microencapsulados, 449
- Polyjet, 544
- Porcelana, 196
esmaltes, 999
- Porosidad, 76, 200-201
en la fundición, 251, 295
en soldaduras, 898
moldeo por inyección, 507
- Portaherramientas, 681
- Posicionamiento exactitud, 1073
sistema, 1070
- Potencia
cepillado, 757
de corte, 579
de rechazado, 424
en el fresado, 672
- martillo a gravedad, 357
mordazas, 638, 1089
- Práctica
de orificio estándar, 1025
estándar del eje, 1025
- Precipitación, 448
aceros inoxidables, 143
endurecimiento, 117-118
- Precipitados, 117
- Precisión, 1009, 1021, 1073
deposición de metal, 551
de repetición, 1021, 1073
forjado, 339, 344
fundición, 267
manufactura, 24
maquinado, 713, 721
- Precocido, 811
- Precursor, 219
- Preformado, 352
forjado, 343
- Preimpregnados, 518
- Premio
Baldrige, 1031
Malcolm Baldrige, 1031
- Prensa
de ajuste, 952
de biela-manivela, 355
de doblado, 951
de doble acción, 418
de freno, 406
de junta de nudillos, 356
de marco en C, 438
estopas, 381
hidráulica, 355-356
inclinable de respaldo abierto, 438
mecánica, 356, 418
tipos, 355
y soplado, procesos, 485
- Prensado
cerámicos y, 480
en húmedo, 480
isostático, 455
cerámicos, 480
en caliente, 455
pseudoisostático, 461
vidrio, 485
- Prensas
compactación de polvo, 454
hidráulicas, 355-356, 376
mecánicas, 438
- Preparación
con reacción química, 998
ensayo de dureza, superficial, 71
pegado adhesivo, superficial, 947
- Presión
adhesivos sensibles, 944
fundición, 278
fundición en dado o inyección, 278
hidrostática
efectos de la, 65
extrusión, 366, 374
metal en polvo, 454
moldeado en bolsa, 520
placa, 392
sinterizado, 481
soldadura a gas, 880
vertido, 278
- Primera Revolución Industrial, 1062
- Primitivos de sólidos, 1106
- Principio de construcción de bloque, 1066
- Probabilidad, 1047
- Procesamiento
a molde abierto, 521
Brush (chapado), 996
de dos fases, 527
de estado blando, 283
del lenguaje natural, 1136
líquido-sólido, 527
termomecánico, 123
- Proceso
Antioch, 268
capacidades del, 29, 1045, 1153
CLA, 277
- CLV, 277
confiabilidad del, 1048
CZ, 285, 805
de cámara caliente, 278
de cámara fría, 278-279
de cera perdida, 271-272
de corrugación para panales, 434
de Czochralski, 285, 805
de espuma perdida, 269-270
de fundición en molde cerámico, 268
de Guerin, 419
de hidroformado, 419-420
de Hooker, 374
de la cuchilla de doctor, 478
de Mannesmann, 332
de molde completo, 269
de polvo de óxido en tubo, 490
de Shaw, 268
de demanda de energía, 1147
Kettool, 557
Kroll, 160
LELE, 813
optimización, 1113
Osprey, 459
planeación, 1110
Replicast C-S, 270
Séjournet, 371
selección, 23, 1155-1157
similitudes, 1114
V, de fundición, 264
viabilidad, 1113
volumétrico de deformación, 18
- Procesos
aditivos, 537, 540
de formación en frío, 261
de fundición con modelo evaporable, 269
en molde permanente, 276
sustractivos, prototipado rápido, 537
- Producción máxima, 724
- Patrones de medición, 1008
- Producción, 1
análisis de flujo de, 1120
cantidad, 1063, 1154
de acero, 129
de la cuna a la tumba, 12
de piezas y partes, 1065
esbelta, 30
holón, 1130
máquinas herramienta, 645
por lotes, 24, 1065, 1160
sin inventarios, 1131
tarjeta, 1132
tasa de, 1065, 1154
- Productividad, 1059
- Producto
calidad, 28, 1030, 1047
confiabilidad, 1048
diseño, 6, 1142, 1144
Especificación de Intercambio de Datos, 1105
integridad, 28
responsabilidad, 30, 1158
- Productos
continuos, 1
de alto valor agregado, 1
discretos, 1
recomendaciones, plásticos, 183
- Profundidad
de corte, 566
de depresión (punzonado), 389
- Programación
de piezas asistida por computadora, 1074
lenguaje de, 1074
manual de piezas, 1074
para CN, 1074
- Promedio
de las raíces cuadradas medias, 967
de línea central, 967
de los promedios, 1043
- Propiedades de materiales diversos, 37-38, 89-90
eléctricas, 94

- físicas, 14, 88
cerámicos, 202
vidrios, 205-206
magnéticas, 95
mecánicas, 13, 37, 56
aceros, 138-139
aceros inoxidables, 143
cerámicos, 200
materiales diversos, 58
metales en polvo, 463-464
polímeros, 170
vidrio, 205-206
ópticas, 95
cerámicas, 202
polímeros, 177
vidrios, 205
químicas, 14
térmicas, 89
Prótesis total de rodilla, 274-276
Protocolo de transferencia de archivos, 1134
Protocolos de transferencia de hipertexto, 1135
Prototipado
rápido, 9, 536, 1064
virtual, 10, 537, 551
Prototipo, 9, 535
Proyecciones, en la fundición, 249
metálicas, 249
Proyectores ópticos de contornos, 1015
Prueba
de abombamiento, 48
de corrosión, soldadura, 905
de flexión envolvente, soldaduras, 905
Pruebas de acopamiento, 400
Puentado, 899
Pulformado, 523
Pulido, 759
a fuego, 489
vidrio, 483
asistido por campo magnético, 761
de dos caras, 759
flotante magnético, 761
magnético, 760
mecánico, 759
Pulsado
deposición por láser, 991
maquinado electroquímico, 778-779
Pultrusión, 523
Pulverización, 448
catódica reactiva, 991
Punteado, 380
Punto
a punto
control, 1070
robot, 1082
ángulo de, 653
de hundimiento, 511
de referencia, 31
defectos, 44
eutéctico, 108
muerto, 637
neutro, 318
no deslizante, 318
nube, 1018
Puntos
calientes, 295
soldadura, 919
pruebas, 920
taladro, 654
Punzonado, 390
de cavidades, 348, 354
Purga, fundición, 252
- Q**
Quemado metalúrgico, 742
Quijadas
de mordaza, 638
maquinables, 1089
suaves, 638
- R**
Radiación infrarroja, 582
Radiador, 421
Radio mínimo de doblez, 403-404
Radiofrecuencia
etiquetas, 1078
pulverización catódica, 808, 992
Radiografía digital, 1050
Rango, 1041
de solidificación, 239
Ranurado, 626, 678
frontal, 626
Ranuradoras, 686
Raquetas de tenis, 525
Rasurado, 395, 576
engranes, 697
Rastreo circular, 1014
Rayo láser
de corte, 397, 895
endurecimiento, 119-121
maquinado, 784
soldadura, 893
soplete, 785
Rayos X, 1051
Reacción
exotérmica, 741
moldeo por inyección, 508
sinterizado, 528
unión, 528
Reacondicionamiento
de herramientas de corte, 616
de taladros, 658
Reactantes, 770
Realzado, 417
Reapuntalamiento, 31, 1160
Rebaba, 389, 692, 761
de soldadura, 923
en el forjado, 342
en el moldeo de plásticos, 507, 513
en la fundición, 298
en la soldadura por fricción, 915-916
taladrado, 652
Rebajo, 500, 576
Rebanado, 806
Reblandecimiento, deformación, 66
Rebordeo, 407
Rebordes
frenos de embutido, 415
moldeo de espuma, 515
Recalcado (forja), 339, 341, 346, 349, 380
ensayo, de forjabilidad, 350
rotativo, 349
Recalcadoras horizontales, 346
Recalentamiento (empape), 121
Rechazado
cizalladura, 424
convencional, 423
de tubos, 425
Reciclaje, 9, 12-13, 1150
de plásticos, 188
Recocido, 49, 121
completo, 121
de vidrio, 488
globular, 122
para relevado de esfuerzos, 81, 122
Reconocimiento de caracteres
ópticos, 1078
Recorrido, 221
Recorte, 343, 372
Recristalización, 49
temperatura de, 49
Rectificado
cilíndrico, 748
de avance final, 751
de avance lento, 751
de avance total, 751
de bajo esfuerzo, 742
de inmersión, 748, 751
de penetración, 751
descendente, 670
economía, 764
electroquímico, 779
energía específica, 740
fluidos, 753
fuerzas, 739
interno, 750
piedras, 730, 733
selección, 746
por descarga electroquímica, 784
postherramienta, 753
proceso, 737
relación, 743
seguridad, 754
sin centros, 750
suave, 742
superficial, 737, 747
temperatura, 741
tipo central, 748
transversal, 748
traqueteo, 754
Rectificadora horizontal
(de bancada) giratoria, 748
Rectificadoras de piso, 753
Rectitud, 1013
Recubrimiento
abrasivos, 756
electrodos, 885
fabricado, 756
herramientas, 609
mecánico, 987
multifase, 611
Recubrimientos
cerámicos, 612, 999
conversión, 980
de carburo de titanio, 609-610
de nitruro de titanio, 609-610
de metal, 980, 988
en nanocapas, 612
para herramientas de corte, 609
para metal laminado, 1000
por conversión, 372, 980, 998
que contienen oxalato, 980
Recuperación, 49
Red de área local, 1134
Redes
de área ancha, 1134
de área personal, 1134
inalámbricas de área local, 1134
neuronales, 27, 1137
Redondez, 1014
Reducción
de residuos, 13
de zona, 59
en la forja, 340
fricción, 971
llama, 878
metales en polvo, 447
Reductores, 1070
Reembutido inverso, 416
Refinación
de aceros, 133
secundaria, 133
Reforzado con fibra
epóxicos, 186
plásticos, 216
Reforzamiento
por laminación, 487
vidrio, 487
Refrigeración por vertido, 618
Refrigerante a través de la
herramienta de corte, 619
Refrigerantes, 617
a base de agua, 978
Régimen dúctil
corte, 721
rectificado, 746
Regímenes de lubricación, 977
Registro, 811
Regla, 1008, 1010
de acero, 1010
de Chvorinov, 247
de la palanca, 104-105
inversa, 106
del 10, 1021
del maquinista, 1010
estándar Mil, 1021
si-entonces, 1136
Rejillas de difracción, 1014
Relación
cerámicos y, 201
de aspecto, 449
de embutido limitante, 413
de Poisson, 59
materiales diversos y, 58
polímeros y, 170
Relaciones estructura-propiedad,
fundición, 241-242
Rellenos, en polímeros, 182
Remaches, 950
Remojo, 428
René, 159
Reofundición, 242, 284
Reposo estable, 640
Representación Octree, 1108
Repujado
formado, 430
ultrasonico, 986
Resistencia, 56
a la abolladura, 399
a la compresión, cerámicos, 201
a la rotura transversal, 67
a peso, relación, 218
coeficiente de, 61, 64
metales diversos, 61
de fibras, 218
de la unión soldada (fuerte), 937
dieléctrica, 90, 94
máxima a la tensión, 58, 62
materiales diversos, 58
polímeros, 170
relación con la fatiga, 74
relación con la dureza, 71
térmica, 601
soldadura, 917
costura, 921
de alta frecuencia, 921
fuerte, 937
por puntos, 919
por proyección, 922
Resistividad eléctrica, 94
Resolución, 1009, 1073
Respiraderos, moldes, 262
Restitución, 404
compensación para, 405
negativa, 404
Retenedor de tornillo óseo, 663-664
Reticula, 810
Retorno
control de, 1070
de la calidad, 1031, 1145
dispositivos de, 1081
sobre la inversión, 1161
Retroalimentación dinámica, 1074
Retroceso, 679
Revenido
martensita, 113
rectificado, 741
térmico, 487
vidrio, 487
Revestimiento
(chapeado), 368, 913, 988
de cromo duro, 996
de fosfato de zinc, 980
de iones, 992
de moldes superior e inferior
fundición, 268
de puerta de refrigerador, 187
electrolítico, 997
mecánico, 987
por galvanoplastia, 994
por impacto, 987
Revestimientos
multifase, 611
orgánicos, 1000
Revista, máquina herramienta,
706, 708
Revolución Industrial, 2, 1054
Riesgo
del consumidor, 1047
del productor, 1047
Riesgos para la salud, 211
polímeros, 186
Rigidez, 56, 59
a peso, relación, 90, 218
de fibras, 218
dinámica, 717
específica, 90
máquinas herramienta, 607, 713

- Rima de rosa, 661
- Rimas, 661, 662
 - ajustables, 662
 - estriadas, 662
- Rizada, viruta, 574
- Robot
 - controlado numéricamente, 1082
 - de aprendizaje asistido, 1082
 - de portal, 1081
 - de recogida y colocación, 1081
 - de reproducción, 1081
 - de secuencia fija, 1081
 - de secuencia variable, 1081
 - de seguridad, 1084
 - ensamble de, 1091
 - móvil, 1081
 - sensorial, 1082
- Robots, 25
 - en ensamble, 1091
 - industriales, 25, 1078
 - inteligentes, 1082
- Robustez, 1035, 1154
- Rociado
 - de alambre térmico, 989
 - de arco con alambres gemelos, 989
 - de gas oxcombustible de alta velocidad, 989
 - de polvo metálico, térmico, 989
 - deposición, 459
 - eléctrico, 989
 - electrostático, 1002
 - moldeo de colocación, 521
 - térmico, 988
 - transferencia, 887
- Rociador, 965
- Rockwell
 - dureza, 68
 - ensayo, 69
- Rodaje, 758, 973
- Rodilla, 681
- Rodillo
 - aplanado, 322
 - bastidor, 320
 - compactación, 459
 - de enderezamiento, 382
 - de recogida, 322
 - densificación, 466
 - esmeril, 748
 - flexión, 407
 - forjado, 328
 - formado, 407
 - lineamientos de diseño, 435
 - materiales, 327
 - separación, 318
 - soldadura, 913
 - por puntos, 921
- Rodillos
 - bruñido, 987
 - de arrastre, 134
 - de nivelación, 324
- Rompimiento, lubricante, 977
- Rosca(s) 649
 - laminación de, 330-331, 649
 - medición, 1015
 - rectificado de, 749
- Roscado, 626
 - calibradores de inserción, 1015
 - sujetadores, 950
 - inserto de, 649
 - tarraja, 649
- Rueda reguladora, 751
- Ruedas reforzadas (rectificado), 736
- Rugosidad, 967
 - altura, 590
 - procesos diversos, 773
 - superficial, 590, 967
 - en el maquinado, 647
 - laminación, 326
 - procesos diversos, 773
- Ruido en el diseño experimental, 1034
- S**
- Salarios por hora, 32
- Salero, 24-25
- Saponificación, 1003
- Satélite pequeño, 792
- SCALPEL, 815
- SCREAM, 850
- Sedimentación, 449
- Segregación
 - inversa, 242
 - normal, 242
 - por gravedad, 242
- Segunda Revolución Industrial, 2, 1062
- Seguridad
 - con los robots, 1084
 - maquinado de magnesio y, 594
 - rectificado y, 754
- Seis sigma, 29, 1042
- Selección
 - critérios de, procesos de
 - manufactura, 16, 1155-1157
 - de materiales, 13
 - de prensa, 438
 - de procesos, 16-17
- Selectividad, 818
- Semiconductor
 - compuesto, 805
 - de óxido metálico, 804
 - transistor de efecto de campo, 801
- Semiconductores, 95, 804
- Semicristalino, 176
- Senos, barra de, 1012
- Sensibilidad, 1021
 - sensible, 44
- Sensor
 - de proximidad, 1086
 - fusión de, 1088
 - tecnología de, 1085
 - validación de, 1088
- Sensores, 1053, 1085-1086
 - digitales, 1085
 - eléctricos, 1086
 - herramientas de corte, 589
 - inteligentes, 1085, 1088
 - magnéticos, 1086
 - mecánicos, 1086
 - químicos, 1086
 - robustos, 1088
 - táctiles, 1086
 - térmicos, 1086
- Separación, 391, 457, 626
 - de brazos, dendritas, 241
 - herramientas de corte, 589
 - modelo, 262
 - tuerca, 637, 649
 - herramientas de corte, 589
 - línea de, 342
 - forjado, 352
 - fundición, 261, 298
- Separadores, 373, 396, 414, 813
- Servicio, diseño para el, 1096
- Servoprensas, 357
- Severidad del templado, 117
- Shewhart, W.A., 1040
- Shore, ensayo de dureza 70
- Sialón, 197, 199, 614
- Sierra circular, 689
- Sierras, 397, 689
 - de hilos de diamante, 689
 - para metales, 689
- Silano, 222
- Silicato de aluminio litio, 199
- Silicatos, 199
- Sílice, 197, 199
 - fundido, 206
 - vidrio, 204
- Silicio, 804
 - carburo, 197-198, 616
 - abrasivos, 731-733
 - de grado electrónico, 805
 - dióxido, 804
 - LIGA, 855-856
 - micromaquinado por grabado de plasma de un solo paso, 850
 - nitruro, 197, 199, 614
 - unión por difusión, 851
- Silicio policristalino, 843
- Silicones, 186, 189
- Silla, 681
- Sillón, nanotubos, 208
- Símbolos, reciclaje, 188
- SIMPLE, 850
- Simulación, por computadora, 1113
- Síndrome del esfuerzo repetitivo, 30
- Sinterizado
 - de cerámicos, 481
 - en fase líquida, 463
 - metales en polvo, 461
 - por microondas, 463, 481
 - selectivo por láser, 461, 545
- Síntesis química, 528
- Sistema
 - a base de almidón, polímeros, 187
 - asincrónico, ensamble, 1093
 - basado en el conocimiento, 1136
 - basado en orificios, 1025
 - básico de eje, 1025
 - básico de orificios, 1025
 - CAPP derivado, 1111
 - CAPP generativo, 1112
 - CAPP variante, 1111-1112
 - de alimentación, 243
 - de canales, 261
 - de costeo, 1158
 - de eje-base, 1025
 - de gestión ambiental, 1039
 - de Numeración Unificado, 137, 152
 - en paquete, 833
 - flexible, 27, 1126
 - hierro-carbono, 107
 - microelectromecánica, 799, 841, 843
 - sincrónico, ensamble, 1091
- Sistemas
 - bifásicos, 103
 - CAD, 1105
 - CAD/CAM, 1110
 - de almacenamiento y recuperación, 1078
 - de codificación, 1119
 - de ensamble flexibles, 1093
 - de estructura, 1136
 - de fluido cortante a alta presión, 618
 - de manufactura holárquica, 1130
 - de manufactura integrados por computadora, 1125
 - de sensores en línea, 1020
 - expertos, 27, 1136
 - software, 1149
 - ensamble, continuos, 1093
- Sobrebrazo, 682
- Sobrecalentamiento, 246
- Sobrecontrol, 1944
- Sobrecorte, 780
- Sobredoble, 405
- Sobrevejecimiento, 119
- Sobremoldeado, 505
- Sobreposición, 899
- Socavación, 819
- Socavaciones, 775
- Socavado, 772, 775, 889
- Soldabilidad, 14, 903
 - soldadura blanda, 943
- Soldada fuerte
 - metales para, 935
 - soldadura, 938
- Soldado
 - calidad de, 898
 - de juntas, 943
 - líneas, moldeo por inyección, 506
 - metal, 896
 - pegado, 940
 - pepita, 919
 - perfil, 899
 - símbolos, 907
- Soldadura
 - a tope, 923
 - blanda, 876, 939
 - ondulatoria, 940
 - reflujo, 940
 - con arco de plasma, 884
 - con arco sumergido, 886
 - con costura, 921
 - con electroescoria, 890
 - con electrogas, 889
 - con haz de electrones, 892
 - con herramienta caliente, 953
 - con hidrógeno atómico, 885
 - con rayo láser, 893
 - con recalado, 923
 - de alta frecuencia
 - inducción, 922
 - resistencia, 921
 - de arco, 882
 - de electrodo revestido, 885
 - de gas metálico, 887
 - de gas tungsteno, 884
 - de núcleo fundente, 888
 - de botón del capacitor de descarga, 924
 - de estampado con costura, 921
 - de pasos múltiples, 886
 - de pistola, 886
 - de plata, 937
 - de postes, 924
 - de puntos, 919
 - de proyección, 922
 - de termita, 880-881
 - diseño, 905
 - economía, 928
 - eficiencia, 883
 - en barra, 885
 - método de la cámara, dados de extrusión, 370
 - por explosión, 925
 - por fricción, 915
 - agitación, 916
 - de inercia, 916
 - lineal, 916
 - por gas a presión, 880
 - por horno, 937
 - por oxcombustible a gas, 877
 - por placa caliente, 953
 - por percusión, 924
 - por reflujo, 833, 940
 - procesos, 22, 912
 - resistencia, 917
 - costura, 921
 - proyección, 922
 - sin fundente, 940
 - ultrasónica, 914, 940
- Soldadura en estado sólido, 462, 912
 - fuerte, 938
 - soplete, 879
 - transferencia de calor en, 883
 - ultrasónica, 914
- Soldadura fuerte, 876, 935
 - herramientas de corte, 614
 - infrarroja, 938
 - metales de relleno, 935
- Soldadura por arco, 882
 - de núcleo fundente, 888
 - gas tungsteno, 884
 - polaridad directa, 882
 - transferencia de calor, 883
- Soldadura por electrodo de corriente negativa directa, 882
 - de corriente positiva directa, 883
- Soldaduras
 - autógenas, 877
 - de distorsión, 901
- Sol-gel, proceso, 528
- Solidificación
 - aleaciones, 241
 - contracción, 238, 249
 - de metales, 238
 - direccional, 285
 - frontal, 238
 - metal de soldadura, 896
 - metales puros, 238
 - rápida, 165, 286
 - tiempo, 247-248
- Sólido
 - curado de suelo, 551
 - fabricación de forma libre, 861
 - fase, 105
 - fase de formado, plásticos, 516
 - fragilización de metal, 47

- lubricantes, 979
 modelo, 1106
 procesamiento de fase, 527
 solución, 103, 106
 Solidus, 104
 Solubilidad, gases, 252
 Soluciones
 semisintéticas, 979
 sintéticas, 979
 sólidas, 103
 Solutio, 102
 Sonda táctil, 707
 Sondas, 707, 1053
 Sondeo directo, 829
 Sonotrodo, 755, 913-914
 Soplado
 en fundiciones, 250
 microabrasivo, 762
 moldeo por, 509
 proceso de soplado y, 484
 relación de, 500
 vidrio, 484
 Soplete, soldadura, 879
 fuerte, 937
 Soporte compuesto, 637
 STEP-NC, 1074
 Subordinado final, 1080
 Sujeción mecánica, 876
 Sujeciones
 flexibles, 1089
 tipo pedestal, 1089
 Sujetadores, 950
 a presión, integrados, 953
 de resorte, 952
 exteriores, 952
 Superabrasivos, 731
 Superacabado, 758
 Superalesaciones a base de cobalto,
 159
 Superalesaciones, 158-159
 a base de hierro, 159
 basadas en níquel, 159
 Superconductor, 94, 489
 de alta temperatura, 490
 procesamiento, 490
 Superconductores de baja
 temperatura, 489
 Superficie(s), 832, 965
 dado de forjado, 342, 353
 de calibración en dado de
 trefilado, 379, 381
 de calibración en extrusión, 369
 pista de desgaste, 584
 Superplasticidad, 64
 Supervisión de la condición de la
 herramienta, 589
 Suspensión
 abrasiva, 755
 de automóvil, 359-360
 infiltración, 528
 magnética, 288
 Sustitución
 de materiales, 1151-1152
 de procesos, 22
 Sustrato, 964
T
 Tabla de surf, 225
 Tablero, 637
 Taconita, 129
 Taguchi, G., 29, 1034
 Taguchi
 función de pérdida de, 1035
 métodos, 1034
 Taladrado, 626, 640, 652
 de centros, 654
 fuerzas, 656
 máquinas, 659
 múltiple, 659
 par de torsión, 656
 Taladro
 con aristas rectas, 655
 de espada, 654
 de punto espiral, 657
 de punto estándar, 653
 del cigüeñal, 652
 escalonado, 654
 radial, 659
 Taladros, 652
 móviles, 658
 reacondicionamiento, 658
 Taller de trabajo, 24, 1062, 1064
 Tamaño
 de la muestra, 1040
 de modo, polvos metálicos, 450
 de sistema, 1024
 del lote, 1040, 1065, 1154
 nominal, 1023
 Tantalio, 162
 Tarimas, 705, 1129
 cambiador automático de, 706
 Tarjeta
 de circuitos impresos de una sola
 cara, 836
 de movimiento, 1132
 de transporte, 1132
 multicapa, 836
 Tasa de falla, circuitos integrados,
 835
 Taylor, F.W., 583
 Técnica de bocallave, 884
 Teflón, 184, 970
 Tejido de liberación, 521
 Tejidos, 221
 Temas ambientales, 12
 Temperatura
 aumento de, 81
 de Curie, 107
 de vertido, 246
 distribución, de corte, 580
 efectos, 63, 180
 homóloga, 50
 rectificado y, 741
 transición y, 77
 Templabilidad, 113
 banda, 116
 Templado, 116, 487
 fragilización, 47, 122
 interrumpido, 122-123
 laminación, 324, 398
 medios, 116
 químico, 487
 severidad de, 117
 Tenacidad, 56, 61, 601
 Tendencias, manufactura, 32
 Tensión frontal, 322
 Tensión, 56
 metal fundido, superficial, 246
 posterior, 322
 Teorema de Bernoulli, 243
 Teoría
 de la abrasión en la fricción, 970
 de la adhesión en la fricción, 969
 Termofijos, 175
 unión de, 955
 Termofluencia, 47, 74
 ensayo de, soldadura, 905
 ruptura, 74
 Termoformado, 511
 Termopares, 582
 Termoplásticos, 178
 unión de, 953
 nombres comerciales, 184
 Terpolímeros, 175
 Textura, 48
 superficial, 966
 Texturizado superficial, 1001
 Tiempo
 de respuesta, 1076
 del ciclo de herramienta, 589
 inactivo, 1159
 Tinción, por lubricantes, 981
 Tintas, polímeros, 182
 Titanio y sus aleaciones, 160
 aleaciones, propiedades mecánicas,
 160
 carbonitruro, 612
 carburo, 197-198, 606
 esponja, 160
 intermetálicos de aluminio, 160
 nitruro, 197, 199
 producción, 160
 Tixoformado, 283
 Tixomoldeo, 283
 Toberas, 129-130
 Tolerancia, 1024
 bilateral, 1024
 control, 1022
 dimensional, 297, 1022
 en el forjado, 353
 en la fundición, 297
 grado, 1025
 internacional
 posicional, 1025
 procesos diversos, 773
 unilateral, 1027
 Tolerancias, 1153
 en forjados, 345
 geométricas, 1021, 1025
 laminación, 326
 Tolva, 495
 Tomografía
 asistida por computadora, 1051
 computarizada, 1051
 Torneado, 479-480, 566, 618-636
 centros de, 708
 de alta dureza 720
 fuerzas de, 630
 Tornillo
 dislocación de, 44
 extrusor, 495
 máquinas, 641
 medida de roscas, 1015
 plastificante, 503
 prensa de husillo, 355
 roscas, 649
 corte, 649
 Torno, 627, 636
 de lecho espaciado, 637
 de motor, 637
 del cuarto de herramientas, 641
 duplicador, 641
 seguidor, 641
 Tornos
 automáticos, 641
 controlados por computadora,
 642
 de torreta, 641
 Torreta
 cuadrada, 642
 de torno tipo martinete, 642
 de torno tipo silla, 642
 Trabajo
 ablandamiento por, 66
 de pensado, 386
 en caliente, 49, 50
 en tibio, 50
 endurecimiento por, 45
 exponente de, 61
 envolvente, 706, 1082
 productivo, 31, 1159
 redundante de deformación,
 378
 Transductores, 589, 914, 1085
 Transferencia
 de dados, 396
 de máquinas, 1066
 globular, 887
 línea de, 704, 1063, 1066
 moldeo de, 513
 sistemas de, ensamble, 1092
 Transformación
 de zirconia templada, 198
 diagramas de, 113
 metalúrgica, 965
 polimórfica, 107
 Transformador diferencial variable
 lineal, 1018
 Transición
 ajuste de, 1025
 temperatura de, 77
 Transistor de efecto de campo,
 800-801
 Transportador, 1012
 Transporte, 637
 Traqueteo
 fresado, 681
 laminación, 323
 maquinado, 716
 marcas, 754
 rectificado, 754
 regenerativo, 717, 754
 Traslapes, 965
 Tratamiento de soluciones, 118
 Tratamientos superficiales, 985
 mecánicos, 986
 Trayectoria continua, 1071
 Trefilado, 365, 377-383
 de barra y alambres, 379
 en húmedo, 381
 en seco, 381
 fuerza, 378
 múltiple, 380
 revenido, 122
 tira, 379
 tubo, 379
 vidrio, 483
 Trepanación, 655, 776
 Trepanado por electrólisis, 776
 Tres rodillos
 laminador de, 321
 molino de, 326
 Tribología, 963
 Triquitas, 220
 Triscado, juego de dientes, 689
 Trituración, 448, 477
 Triturado
 afilado, 744
 formado, 744
 Tronzado, 626
 Troquelado, 390
 fino, 391
 fotoquímico, 774
 químico, 774
 Troqueles compuestos, 395
 Tubo de escape, defecto, 375
 Tubo
 abombamiento, 410-411
 defectos, 133, 375
 doblado, 409
 extrusión, 369
 plásticos, 498
 hidroformado, 420-421
 laminación, 333
 manufactura, 332
 recalcado, 349
 rechazado, 425
 Tungsteno, 161
 carburo de, 197-198, 605
 electrodo de, 882
 Turbulencia, en la fundición, 245
U
 Udimet, 159
 Ultraprecisión
 manufactura de, 24
 maquinado de, 713, 721
 Unidades de potencia del cabezal,
 1066
 Unión, 873, 913
 agentes, 257
 con rodillos calientes, 913
 covalente, 196
 de cerámicos, 956-957
 de estado líquido-sólido, 935
 de plásticos, 876
 de termofijos, 955
 de vidrios, 957
 electromagnética, 955
 materiales, 733
 polímeros, 173
 por difusión, 426
 revestida, 988
 rodillo, 913
 soldada, 896
 pruebas, 905
 termoplástica, 736
 virtudes, 830
 Uniones soldadas, método no
 destrutivo, 905
 Universo, 1040
 Uno y hecho, 709
 Urea, 186
 UV-LIGA, 855
V
 Vacancia, 44
 Vacante, 44, 76
 Vaciado, 515

- Vacío
 - evaporación al, 991
 - fundición al, 276-277
 - horno al, 130-131
 - moldeo al, 264
 - rociado de plasma al, 989
 - Valor, 1161
 - agregado, 1
 - análisis, 1161
 - de la estima, 1161
 - de uso, 1161
 - del prestigio, 1161
 - flujos de, 1133
 - identificación, 1132
 - van der Waals
 - enlaces de, 173
 - fuerza de, 40
 - Vapor
 - capa de, 117
 - desengrasado con, 1003
 - deposición por, 989
 - física de, 991
 - química de, 992
 - fase
 - epitaxia, 808
 - transporte, 463
 - Variabilidad, 1040
 - Variaciones
 - al azar, 1039
 - asignables, 1039
 - Vehículo guiado, automatizado, 1078
 - Velocidad
 - de agrietamiento, 375
 - de carga, 1160
 - de deformación
 - exponente, 64
 - polímeros, 179
 - de enfriamiento, 241
 - en fundiciones, 241
 - de respuesta, instrumentos, 1021
 - de ruptura, piedras de esmeril, 754
 - metales, 64
 - óptica de corte, 586, 724
 - sensibilidad, 64, 179, 397
 - Verificación, calor, 280, 742
 - Vía, 829, 836
 - Vibración
 - autoexcitada, 717
 - en fresado, 681
 - en laminación, 323
 - en maquinado, 716
 - forzada, 716
 - ultrasónica, 971
 - Vida
 - de servicio, 14
 - óptima de la herramienta, 725
 - Vidrio, 204
 - a prueba de balas, 487
 - cerámicos, 197, 206, 486
 - de aluminio, 205
 - de borosilicato, 205
 - E, 219, 223
 - E-CR, 219
 - extrusión, 371
 - fibras, 205, 219, 486
 - flotado, 483
 - formado, 483
 - formador, 206
 - lana, 486
 - lubricación, 980
 - punto, 177
 - revenido, 487
 - S, 219
 - sódico-cálcico, 205
 - temperatura de transición, 177-178
 - tubos y varillas, 484
 - Vidrios, 197
 - como lubricantes, 371, 980
 - fortalecimiento, 487
 - metálicos, 165, 286
 - propiedades físicas, 205-206
 - mecánicas, 205-206
 - Virola, 924
 - Viruta(s), 567
 - ángulo de flujo, 576
 - aserradas, 571-572
 - brochas, 685
 - continuas, 571-572
 - de metal, 571
 - discontinuas, 571, 573
 - formación, desgaste abrasivo, 974
 - formación, rectificado, 738
 - manejo, 648, 709
 - maquinado, 800, 806
 - metal, 571
 - profundidad de corte, 671
 - recolección, 709
 - relación de compresión, 569
 - rizo, 574
 - rompedores, 572, 574, 607, 654
 - segmentadas, 571
 - sistemas de recolección, 647
 - Viscosidad, 284
 - metal fundido y, 246
 - polímeros y, 173
 - Vitrificado, 999
 - de piedras de esmeril, 744
 - Volumen
 - de cilindrado, 1106
 - específico, polímeros, 177
 - fracción, 223
 - imperfecciones, 44
 - Voxels, 1108
 - Vulcanización, 175, 189, 517
 - Vulcanizado a temperatura ambiente, 557
- W**
- Waspaloy, 159
 - Whitney, E., 6, 1040
 - Woodruff, 678
- Z**
- Zigzag, nanotubos, 208
 - Zinc, 163
 - Zirconia parcialmente estabilizada, 196-197
 - Zirconia, 196-197
 - Zirconio, 162
 - Zona
 - afectada por el calor, 785, 896, 965
 - blanda, 239
 - cortante primaria, 572
 - de aserrado, 690
 - de metal muerto en la extrusión, 367

LISTA DE EJEMPLOS

- 1.1 Número de granos en un clip para papel 47
- 2.1 Cálculo de la resistencia máxima a la tensión 62
- 2.2 Cálculo del módulo de resiliencia a partir de la dureza 71
- 9.1 Cálculo de la rigidez de un compuesto y de la carga soportada por las fibras 224
- 10.1 Tiempos de solidificación para varias formas 248
- 13.1 Cálculo de la fuerza de laminación y del torque en laminación plana 320
- 14.1 Cálculo de la fuerza de forjado en el recalado 341
- 15.1 Cálculo de la fuerza en la extrusión en caliente 367
- 16.1 Cálculo de la fuerza de punzón 390
- 18.1 Cambios dimensionales durante el moldeo de componentes cerámicos 482
- 19.1 Película soplada 501
- 19.2 Fuerza requerida en el moldeo por inyección 508
- 21.1 Energías relativas en el corte 580
- 21.2 Incremento de la vida de la herramienta mediante la reducción de la velocidad de corte 585
- 21.3 Efecto de la velocidad de corte en la remoción de material 586
- 22.1 Efectos de los fluidos de corte en el maquinado 617
- 23.1 Tasa de remoción de material y fuerza de corte en el torneado 636
- 23.2 Piezas comunes elaboradas en tornos de CNC 643
- 23.3 Maquinado de formas complejas 644
- 23.4 Tasa de remoción de material y par en el taladrado 657
- 24.1 Tasa de remoción de material, potencia, torque y tiempo de corte en el fresado de bloque 672
- 24.2 Tasa de remoción del material, potencia requerida y tiempo de corte en el fresado refrentado 676
- 26.1 Fuerzas al rectificar una superficie 740
- 26.2 Acción de una piedra abrasiva 744
- 26.3 Patrones del ciclo en el rectificado cilíndrico 750
- 26.4 Rectificado *versus* torneado de alta dureza 753
- 26.5 Rectificado con banda de paleta de una boquilla de turbina 757
- 27.1 Combinación de corte con rayo láser y punzonado de una placa de metal 786
- 30.1 Velocidad de la soldadura para diferentes materiales 883
- 30.2 Soldadura con láser de navajas de afeitar 894
- 30.3 Selección del diseño de la soldadura 908
- 31.1 Unión por rolado de la moneda estadounidense de 25 centavos 913
- 31.2 Calor generado en la soldadura por puntos 920
- 31.3 Soldadura con resistencia versus soldadura con rayo láser en la manufactura de latas 924
- 31.4 Aplicaciones de la soldadura por difusión 927
- 32.1 Soldadura blanda de componentes en una tarjeta de circuitos impresos 941
- 33.1 Determinación del coeficiente de fricción 973
- 34.1 Aplicaciones de la ingeniería de superficies con láser 994
- 34.2 Recubrimientos cerámicos para aplicaciones de alta temperatura 1000
- 35.1 La medición de la longitud a través de la historia 1009
- 35.2 Máquina de medición por coordenadas para carrocerías de automóvil 1020
- 36.1 Producción de tubos de polímero 1036
- 36.2 Incrementar la calidad sin incrementar el costo del producto 1037
- 36.3 Cálculo de los límites del control y de la desviación estándar 1046
- 37.1 Origen histórico del control numérico 1069
- 39.1 Sistemas de manufactura flexible en compañías grandes y pequeñas 1129
- 40.1 Manufactura sustentable de los zapatos deportivos Nike 1146
- 40.2 Sustitución de materiales en los productos 1152
- 40.3 Sustitución de procesos en los productos 1157
- 40.4 Selección del proceso al fabricar una parte sencilla y simétrica respecto de sus ejes 1158

REFERENCIAS A TEMAS DIVERSOS (Los números de página están entre paréntesis)

Propiedades de los materiales

Tablas 2.1 (56), 2.2 (58), 2.3 (61) y figuras 2.4, 2.6, 2.7, 2.8, 2.15, 2.16, 2.17, 2.29
 Tablas 3.1 (89), 3.2 (90) y figuras 3.1, 3.2, 3.3
 Tablas 5.2 (136), 5.4 (139) y 5.5 (140)
 Tablas 6.3 a 6.10 (152 a 160)
 Tablas 7.1 (170), 7.2 (178), 7.3 (183)
 Tablas 8.1 (197), 8.2 (201), 8.3 (205)
 Tablas 9.1 (217), 9.2 (218), 9.3 (227) y figuras 9.3, 9.5, 9.7
 Tabla 10.1 (249)
 Tabla 11.3 (280)
 Tablas 12.3 (305), 12.4 (306), 12.5 (306) y figura 12.4
 Tablas 16.2 (398), 16.3 (403), 16.4 (415) y figura 16.14
 Tablas 17.3 (464), 17.4 (465), 17.5 (465) y figura 17.10
 Tabla 20.2 (539)
 Tablas 22.1 (602), 22.2 (603), 22.3 (603), 22.5 (608) y figuras 22.1, 22.9
 Tabla 26.1 (731)
 Tabla 32.3 (944)

Características de manufactura de los materiales

Tabla I.3 (14)
 Tabla 4.1 (120)
 Tabla 5.8 (145)
 Tabla 6.2 (151)
 Tablas 12.1 (297), 12.6 (308)
 Tabla 14.3 (349)
 Tabla 16.3 (403) y figura 16.33
 Tablas 17.1 (454), 17.2 (462)
 Tablas 21.1 (568), 21.2 (579)
 Figura 22.2

Tolerancias dimensionales y acabado superficial

Tabla 11.2 (259)
 Tabla 23.1 (627) y figuras 23.13, 23.14
 Figura 25.16
 Figura 27.4
 Figuras 35.19, 35.20
 Figuras 40.4, 40.5

Capacidades de los procesos de manufactura

Tablas 11.1 (257), 11.2 (259)
 Tabla III.1 (314)
 Tabla 14.1 (339), 14.4 (356)
 Tabla 16.1 (388)

Sección 17.7 y figura 17.14
 Tabla 18.1 (476)
 Tablas 19.1 (495), 19.2 (530)
 Tabla 20.1 (538)
 Tablas 23.1 (627), 23.6 (637), 23.8 (645), 23.10 (648)
 Tablas 26.3 (746), 26.4 (747)
 Tabla 27.1 (771)
 Tabla VI.1 (876)
 Tabla 30.1 (878)
 Tabla 32.4 (945)
 Tabla 34.1 (1000)
 Tabla 37.2 (1064) y figura 37.3
 Tabla 39.1 (1128)
 Tablas 40.3 (1149), 40.5 (1155) y figuras 40.2, 40.3, 40.5

Consideraciones de diseño en el procesamiento

Procesos abrasivos: Sección 26.5
 Maquinado avanzado: Varias secciones del capítulo 27
 Fundición: Sección 12.2
 Formado de cerámicos: Sección 18.5
 Forjado: Sección 14.6
 Tratamiento térmico: Sección 4.13
 Procesos de unión: Varias secciones en los capítulos 30 a 32
 Maquinado: Secciones en los capítulos 23 a 24
 Procesamiento de polímeros: Sección 19.15
 Metalurgia de polvos: Sección 17.6
 Formado de hojas metálicas: Sección 16.13

Costos generales y economía

Tablas I.5 (29), I.6 (31), I.7 (32) y sección I.10
 Tabla 6.1 (151)
 Sección 12.4
 Sección 14.9
 Sección 16.15
 Tabla 17.6 (469) y sección 17.7
 Tabla 19.2 (530) y sección 19.16
 Sección 25.8
 Sección 26.9 y figura 26.35
 Sección 27.11
 Sección 31.8
 Sección 32.7
 Sección 37.11
 Sección 39.9
 Tabla 40.6 (1159) y sección 40.9

FACTORES DE CONVERSIÓN

1 pulg = 25.4 mm = 0.0254 m
 1 mm = 0.0394 pulg
 1 pie = 0.3048 m
 1 lb (fuerza) = 4.448 N
 1 lb (masa) = 0.4536 kg
 1 ton = 2240 lb

1 tonelada = 1000 kg
 1 psi = 6.895 kPa
 1 ksi = 6.895 MPa
 1 MPa = 145 psi
 1 pie × lb = 1.356 J
 1 BTU = 1055 J = 778 pie × lb

1 hp = 746 W = 550 pie × lb/s
 1 kW = 1.34 hp = 3413 BTU/h
 $^{\circ}\text{F} = 9/5 \text{ }^{\circ}\text{C} + 32$
 $^{\circ}\text{C} = 5/9 (\text{ }^{\circ}\text{F} - 32)$
 $\text{K} = \text{ }^{\circ}\text{C} + 273.15$

En esta séptima edición de Kalpakjian, nuestro objetivo sigue siendo proporcionar un libro de texto completo y vanguardista sobre manufactura, ingeniería y tecnología, con los objetivos adicionales de crear desafíos en los estudiantes durante el estudio de esta importante disciplina.

El libro está dirigido a estudiantes de ingeniería mecánica, de manufactura, industrial, aeroespacial, metalúrgica y de materiales, así como de ingeniería biomédica. Al igual que en ediciones anteriores, se presenta una visión general de esta disciplina, con énfasis en una cobertura especialmente cualitativa de la ciencia, la tecnología y la práctica de la manufactura.

Este primer volumen se enfoca en la tecnología de materiales con temas y casos reales a través de situaciones que se presentan en la industria manufacturera.

El texto ha sido revisado y actualizado totalmente. Entre las modificaciones específicas sobresalen:

- La ampliación de los análisis sobre el carbono en sus formas útiles, como nanotubos y grafeno.
- Ampliación de las consideraciones del diseño de productos para procesos de manufactura.
- Servoprensas para el forjado y el formado de hojas metálicas.
- Estampado en caliente de hojas metálicas.
- Análisis ampliado del sinterizado, las propiedades del material, la compactación explosiva, la densificación por rollo y la síntesis por combustión en la metalurgia de polvos.
- Estudio del formado neto por láser de ingeniería y máquinas autorreplicantes en el prototipado rápido.

Para mayor información visite la página Web del libro:
www.pearsonenespañol.com/kalpakjian

Visítenos en:
www.pearsonenespañol.com



En esta séptima edición de Kalpakjian, nuestro objetivo sigue siendo proporcionar un libro de texto completo y vanguardista sobre ingeniería de manufactura y tecnología, con los objetivos adicionales de crear desafíos en los estudiantes durante el estudio de esta importante disciplina.

El libro está dirigido a estudiantes de ingeniería mecánica, de manufactura, industrial, aeroespacial, metalúrgica y de materiales, así como de ingeniería biomédica. Al igual que en ediciones anteriores, se presenta una visión general de esta disciplina, con énfasis en una cobertura especialmente cualitativa de la ciencia, la tecnología y la práctica de la manufactura.

En este segundo volumen se hace énfasis en los procesos de manufactura con temas y casos reales a través de situaciones que se presentan en la industria.

El texto ha sido editado a fondo y totalmente actualizado. Entre las modificaciones específicas sobresalen:

- Sistemas de enfriamiento de las herramientas en los procesos de maquinado.
- Láser electrolítico MicroJet y maquinado por arco azul.
- Detección visual a través de sensores.
- Análisis del flujo de producción.
- Desarrollo de MTConnect.
- Consumo de energía en la manufactura.

Para mayor información visite la página Web del libro:
www.pearsonenespañol.com/kalpakjian

