MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Ingeniería y tecnología de materiales

Volumen 1
Séptima edición

Serope Kalpakjian
Steven R. Schmid

ALWAYS LEARNING

PEARSON

LISTA DE TABLAS

Introducción general

I.1 Número aproximado de piezas en productos 1
I.2 Desarrollo histórico de materiales, herramientas y procesos de manufactura 3
I.3 Características generales de manufactura de diversos materiales 14
I.4 Esperanza de vida promedio para diversos productos 29
I.5 Costo relativo de reparación en diversas etapas del desarrollo y la venta de los productos 29
I.6 Desglose de costos típico en la industria manufacturera 31
I.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 bronces 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 compósito 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
20.2 Propiedades mecánicas de los materiales seleccionados para el prototipado rápido 539

Parte IV Procesos de maquinado y máquinas herramienta
21.1 Factores que influyen en las operaciones de maquinado 568
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
21.3 Rangos de *n* valores para la ecuación de Taylor (21.25) para distintos materiales de la herramienta 584
21.4 Pista de desgaste promedio permisible (vea *VB* en la figura 21.15a) para herramientas de corte en varias operaciones de maquinado 602
22.1 Características generales de los materiales para herramientas 602
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
22.3 Características generales de operación de los materiales para la herramienta de corte 603
22.4 Clasificación ISO de herramientas de corte hechas de carburo de acuerdo con su uso 608
22.5 Clasificación de carburos de tungsteno de acuerdo con las operaciones de maquinado requeridas 608
23.1 Características generales de los procesos de maquinado y tolerancias dimensionales comunes 627
23.2 Recomendaciones generales para los ángulos de la herramienta en el torneado 629
23.3 Resumen de parámetros y fórmulas para el torneado 631
23.4 Recomendaciones generales para operaciones de torneado (sólo son una guía, en la práctica es frecuente que se excedan) 632
23.5 Comparación de los parámetros de procesamiento para herramientas de SiN y BNc para trabajar el refrentado de un freno de disco 635
23.6 Recomendaciones generales para fluidos de corte en maquinado (vea también la sección 33.7) 637
23.7 Capacidades comunes y dimensiones máximas de la pieza de trabajo para máquinas herramienta 638
23.8 Resumen de maquinado para el ejemplo 23.3 645
23.9 Tasas de producción comunes para varias operaciones de maquinado 646
23.10 Guía general de problemas en las operaciones de torneado 648
23.11 Capacidades generales de las operaciones de taladrado y mandrinado 653
23.12 Recomendaciones generales para velocidades y avances en el taladrado 658
23.13 Guía general de problemas en las operaciones de taladrado 659
24.1 Resumen de los parámetros y fórmulas del fresado periférico 672
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
24.3 Guía general de solución de problemas en las operaciones de fresado 680
26.1 Rangos de dureza Knoop de distintos materiales y abrasivos 731
26.2 Requerimientos de la energía específica aproximada para rectificado de una superficie 740
26.3 Rangos comunes de velocidades y avances para procesos abrasivos 746
26.4 Características generales de los procesos de rectificado abrasivo y de rectificadoras 747
26.5 Recomendaciones generales para el uso de fluidos en el rectificado 754
27.1 Características generales de los procesos del maquinado avanzado 771
27.2 Aplicaciones generales de los láseres en la manufactura 785
27.3 Clasificación de satélites 792

Parte VI Procesos y equipos para unir
VI.I Comparación de varios métodos de unión 876
30.1 Características generales de los procesos de soldadura por fusión 878
30.2 Energías específicas aproximadas que se requieren para fundir un volumen unitario de metales comunes por soldar 883
30.3 Nomenclatura para electrodos de acero de bajo carbono (dulce) recubiertos 892
32.1 Metales de aporte de uso común en la soldadura fuerte de varios metales y aleaciones 936
32.2 Selección de soldaduras blandas comunes y sus aplicaciones más frecuentes 939
32.3 Propiedades y características comunes de adhesivos estructurales químicamente reactivos 944
32.4 Características generales de los adhesivos 945

Parte VII Tecnología de superficies
34.1 Recubrimientos cerámicos usados para aplicaciones de alta temperatura 1000

Parte VIII Metrología, instrumentación y aseguramiento de la calidad en la ingeniería
35.1 Clases de ajuste 1026
35.2 Tolerancias recomendadas en mm para las clases de ajuste 1026
36.1 Los 14 puntos de Deming 1033
36.2 Constantes para las gráficas de control 1044
36.3 Datos para el ejemplo 36.3 1046

Parte IX La manufactura en un ambiente competitivo
37.1 Historia de la automatización de los procesos de manufactura 1061
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

Datos de catalogación bibliográfica

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.
Atlacomulco 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
Resumen 82 Términos clave 83 Bibliografía 83
Preguntas de repaso 84 Problemas cualitativos 84
Problemas cuantitativos 85 Síntesis, diseño y proyectos 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
Resumen 97 Términos clave 98 Bibliografía 98
Preguntas de repaso 98 Problemas cualitativos 98
Problemas cuantitativos 99 Síntesis, diseño y proyectos 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
Resumen 189 Términos clave 190 Bibliografía 190
Preguntas de repaso 191 Problemas cualitativos 191
Problemas cuantitativos 192 Síntesis, diseño y proyectos 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
Resumen 211 Términos clave 212 Bibliografía 212
Preguntas de repaso 212 Problemas cualitativos 213
Problemas cuantitativos 213 Síntesis, diseño y proyectos 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
Resumen 230 Términos clave 230 Bibliografía 230
Preguntas de repaso 231 Problemas cualitativos 231
Problemas cuantitativos 232 Síntesis, diseño y proyectos 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 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 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 herramentales 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 oxicombustible 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
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
Resumen 1138 Términos clave 1139 Bibliografía 1139
Preguntas de repaso 1139 Problemas cualitativos 1140
Síntesis, diseño y proyectos 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
Resumen 1162 Términos clave 1162 Bibliografía 1162
Preguntas de repaso 1163 Problemas cualitativos 1163
Síntesis, diseño y proyectos 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 inoxidables 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.

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

- 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).

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 disciplina 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 Politécnica Superior d'Alcoi, Universitat Politecnica de Valéncia, 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 Worchester 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
R. Abella
D. Adams
S. Arellano
D. D. Arola
R. A. Arlt
V. Aronov
A. Bagchi
E. D. Baker
J. Barak
J. Ben-Ari
G. F. Benedict
S. Bhattacharyya
JT. Black
W. Blanchard
C. Blathras
G. Boothroyd
D. Bourell
B. Bozak
N. N. Breyer
C. A. Brown
R. G. Bruce
J. Cesarone
T. C. Chang
R. L. Cheaney
A. Cheda
S. Chelikani
S. Chen
S. W. Choi
J. M. Prince
D. W. Radford
W. J. Riffe
R. J. Rogalla
Y. Rong
A. A. Runyan
G. S. Saletta
M. Salimian
M. Savic
W. J. Schoech
S. A. Schwartz
M. Selles
A. Cinar
R. O. Colantonio
P. Cotnoir
P. J. Courtney
P. Demers
D. Descoteaux
M. F. DeVries
R. C. Dix
M. Dollar
D. A. Dornfeld
H. I. Douglas
M. Dugger
D. R. Durham
D. Duvall
S. A. Dynan
K. F. Ehmann
J. El Gomayel
M. G. Elliott
N. X. Fang
E. C. Feldy
J. Field
G. W. Fischer
D. A. Fowley
R. L. French
B. R. Fruchter
D. Furrer
R. Giese
E. Goode
K. L. Graham
S. Shepel
R. Shivpuri
M. T. Siniawski
J. E. Smallwood
J. P. Sobczak
L. Soisson
P. Stewart
J. Stocker
L. Strom
A. B. Strong
K. Subramanian
T. Sweeney
P. Grigg
M. Grujicic
P. J. Guichelaar
B. Harriger
D. Harry
M. Hawkins
R. J. Hocken
E. M. Honig, Jr.
Y. Huang
S. Imam
R. Ivester
R. Jaeger
C. Johnson
D. Kalisz
J. Kamman
S. G. Kapoor
R. L. Kegg
W. J. Kennedy
R. Kerr
T. Kesavadas
J. E. Kopf
R. J. Koronkowski
J. Kotowski
S. Krishnamachari
K. M. Kulkarni
T. Lach
L. Langseth
M. Levine
B. S. Levy
T. Taglialavore
M. Tarabishy
K. S. Taraman
R. Taylor
B. S. Thakkar
A. Trager
A. Tseng
C. Tszang
M. Tuttle
J. Vigneau
G. A. Volk
G. Wallace
J. Lewandowski
X. Z. Li
Z. Liang
B. W. Lilly
D. A. Lucca
M. Madou
S. Mantell
L. Mapa
R. J. Mattice
C. Maziar
T. McClelland
L. McGuire
K. E. McKee
K. P. Meade
M. H. Miller
T. S. Milo
D. J. Morrison
S. Mostovoy
C. Nair
P. G. Nash
J. Nazemetz
E. M. Odom
U. Pal
S. J. Parelukar
T. Pasang
Z. J. Pei
J. Penaluna
M. Philpott
M. Pradheeradhi
J. F. Wang
K. J. Weinmann
R. Wertheim
K. West
J. Widmoyer
K. R. Williams
G. Williamson
B. Wiltjer
P. K. Wright
N. Zabaras

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

I.1 ¿Qué es la manufactura?

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

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

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*.

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

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

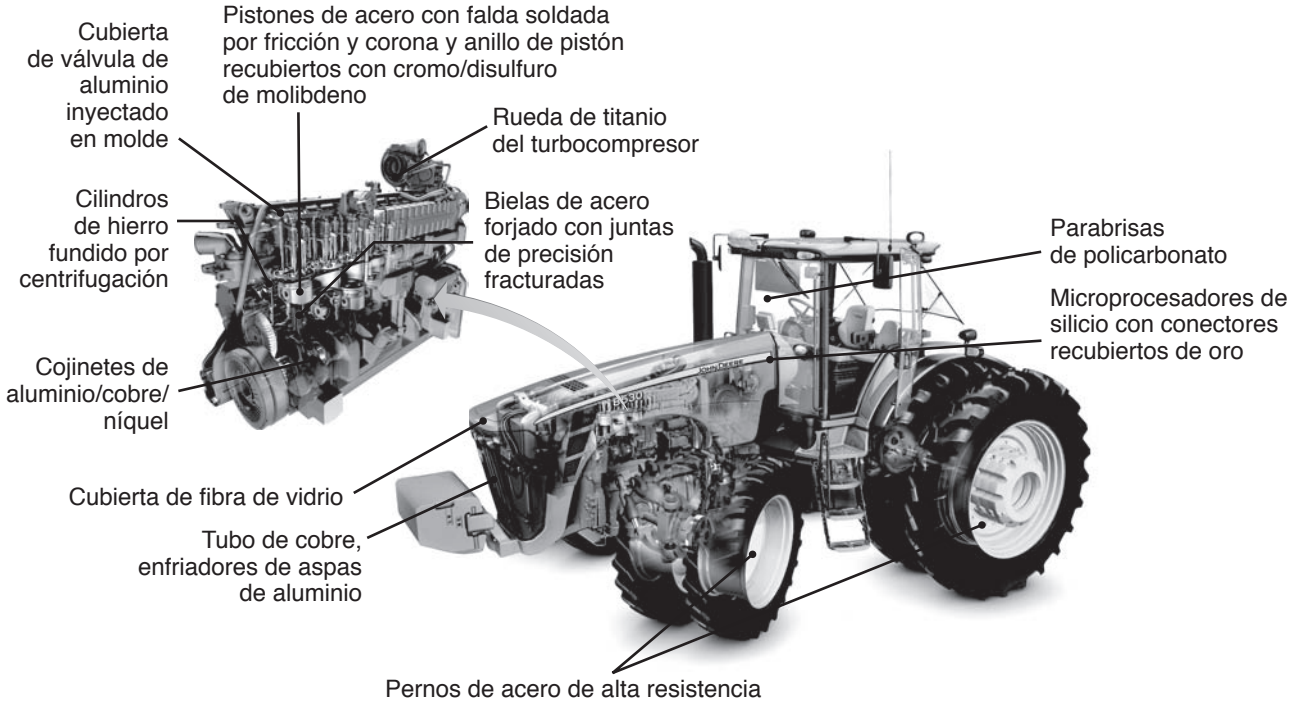


FIGURA I.1 Tractor John Deere modelo 8430, con ilustración detallada de su motor diesel, que muestra la variedad de materiales y procesos incorporados en su manufactura. *Fuente:* Cortesía de John Deere Company.

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
		~ 4000 a. C.	Oro, cobre, hierro de meteoritos.	Barro, cristales, fibras naturales.	Martillado.		Herramientas de piedra, pedernal, madera, hueso, marfil, herramientas de compósitos.
Grecia: ~ 1100 a. C-146 a. C.	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.
	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.
Edad Media: ~ 476-1492		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.
	Renacimiento: 1400-1600	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.
		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.

(*continúa*)

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
	1700	Hierro fundido maleable, acero al crisol (barras y perfiles de hierro).		Extrusión (tubo de plomo), embutido profundo, laminado.		
Primera revolución industrial: ~ 1780-1850	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 copiador 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.
	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.
Segunda revolución industrial: 1947-	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	Reofundido, 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.

I.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 redunda 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*

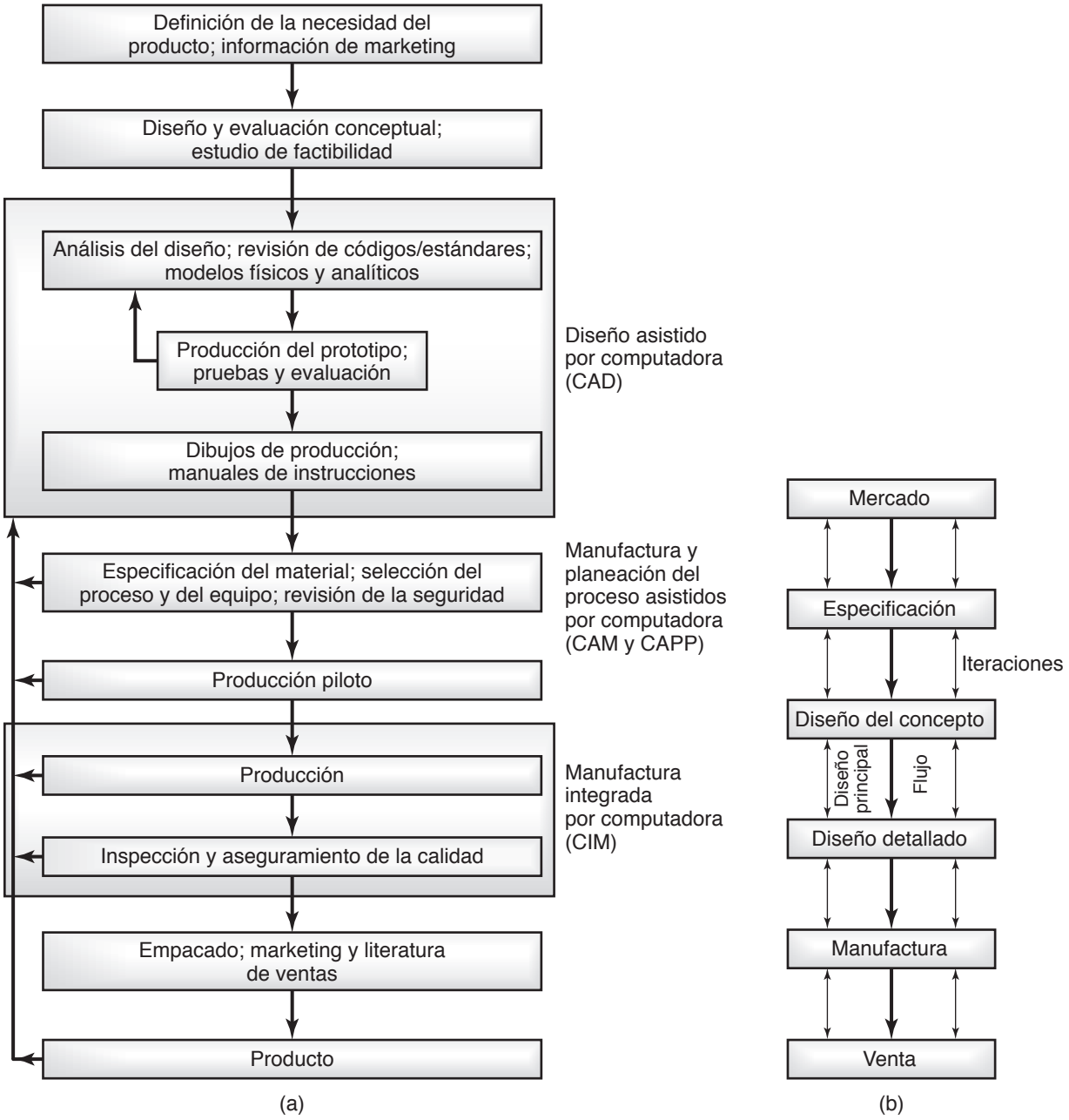


FIGURA I.2 (a) Gráfica que muestra las distintas etapas implicadas en el diseño y la manufactura *tradicionales* de un producto. Dependiendo de la complejidad del producto y del tipo de materiales utilizados, el lapso entre el concepto original y la comercialización del producto puede variar desde unos 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.

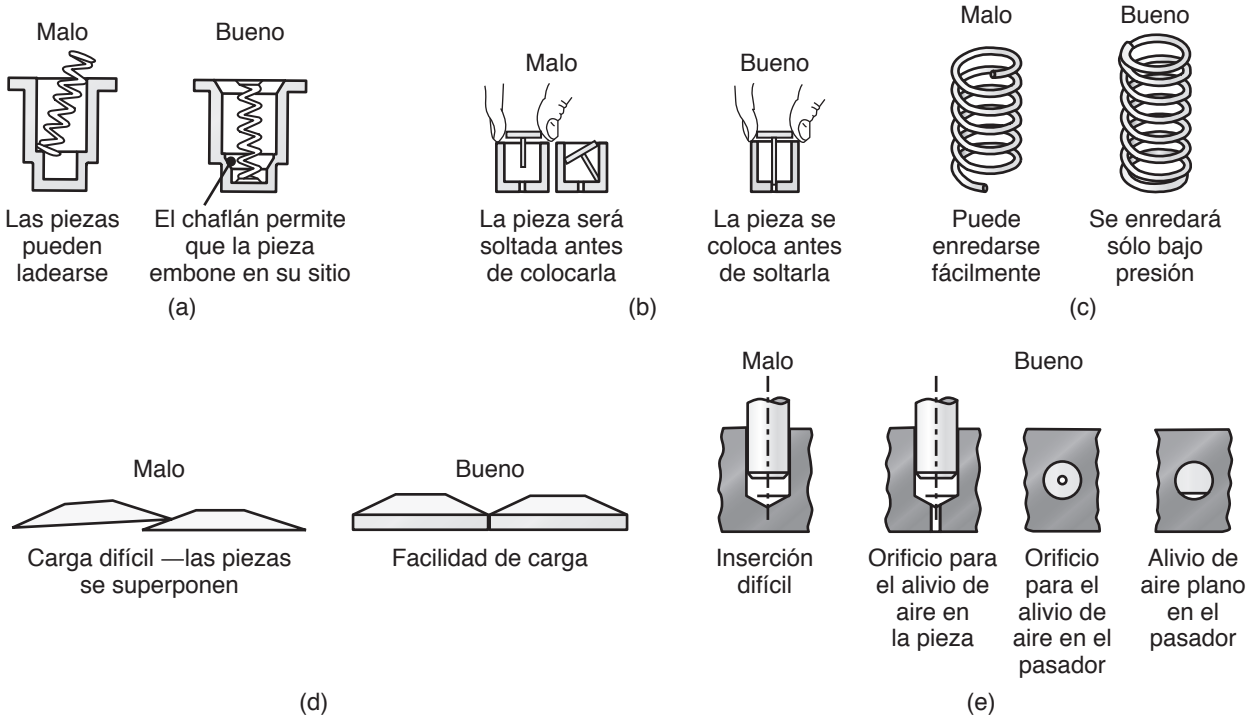


FIGURA I.3 Rediseño de piezas para facilitar el ensamble. *Fuente:* Según G. Boothroyd y P. Dewhurst.

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, maquinar, 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 compósito.

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 compósito (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 desarrollos 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), lapeado, 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.

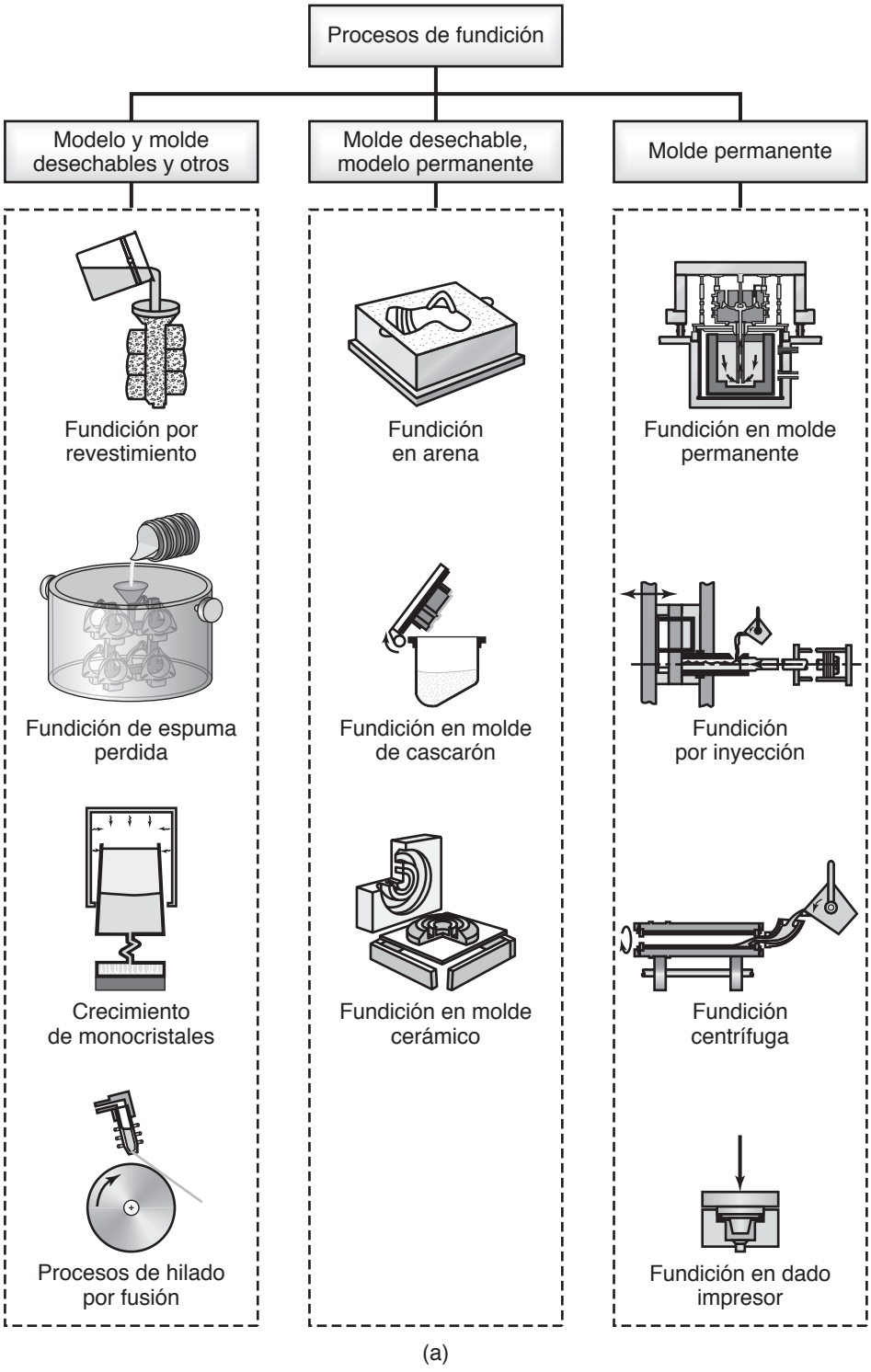


FIGURA I.5a Ilustraciones esquemáticas de diversos procesos de fundición.

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-

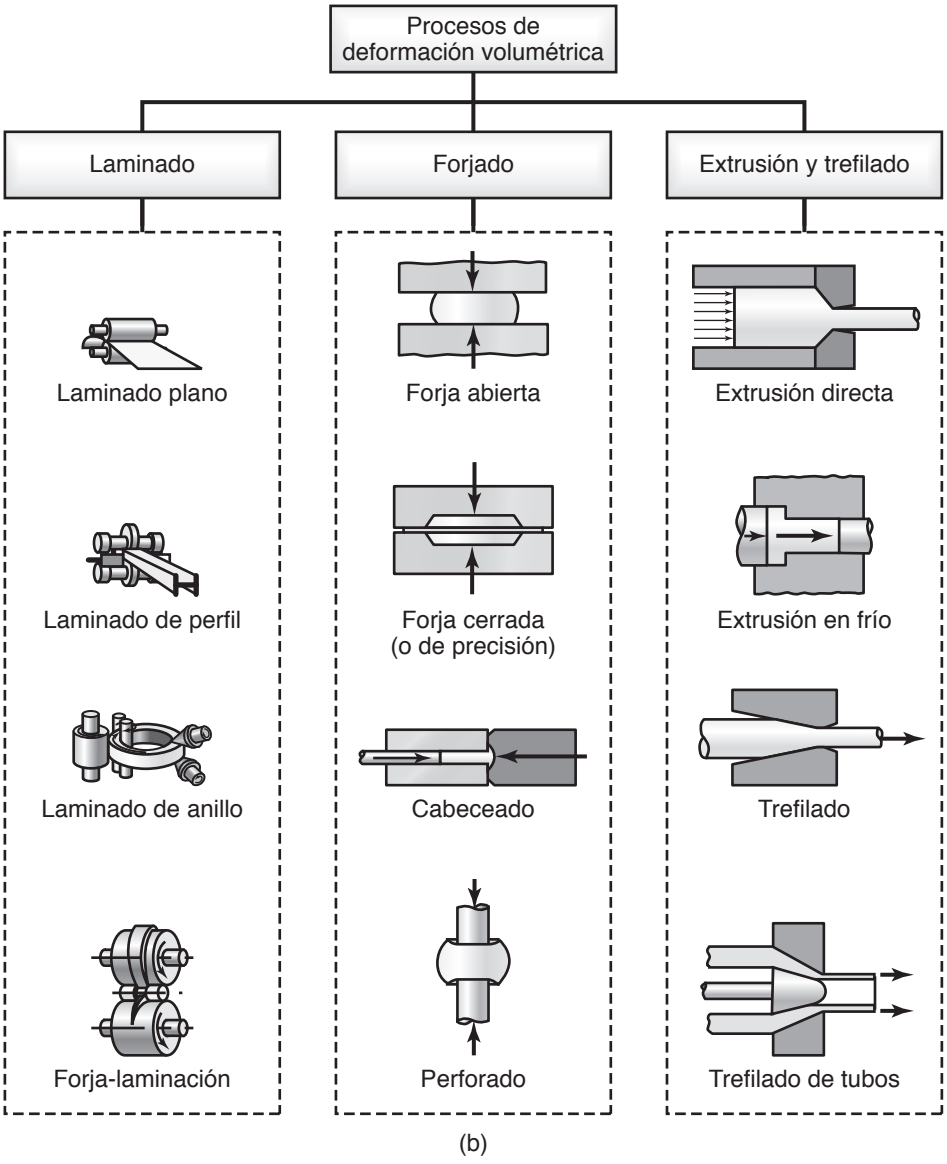


FIGURA I.5b Ilustraciones esquemáticas de diversos procesos de deformación volumétrica.

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

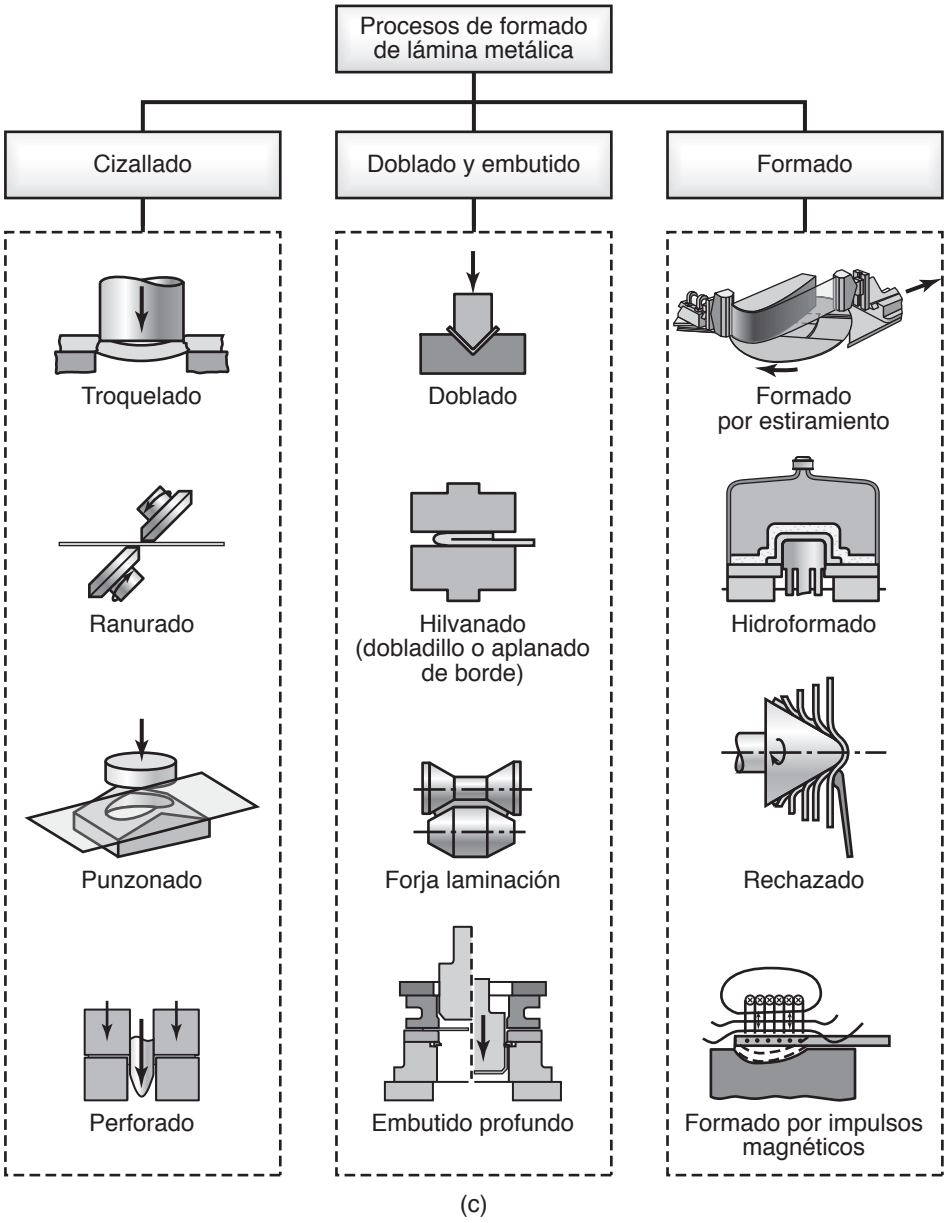


FIGURA I.5c Ilustraciones esquemáticas de varios procesos empleados para el formado de lámina metálica.

muestra en la figura I.6. Este método elimina la necesidad de emplear herramentales 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.

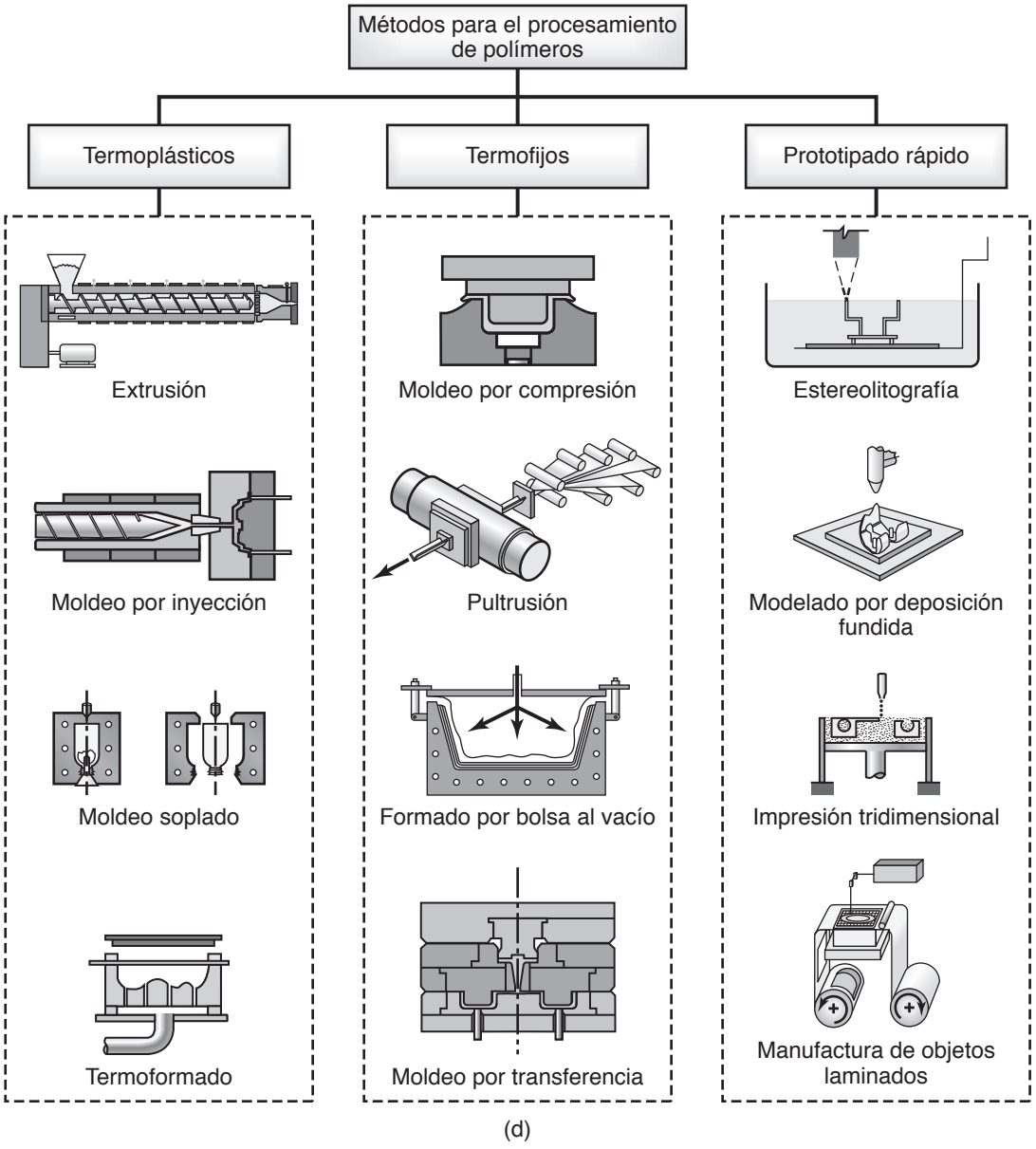


FIGURA I.5d Ilustraciones esquemáticas de varios métodos utilizados para el procesamiento de polímeros.

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,

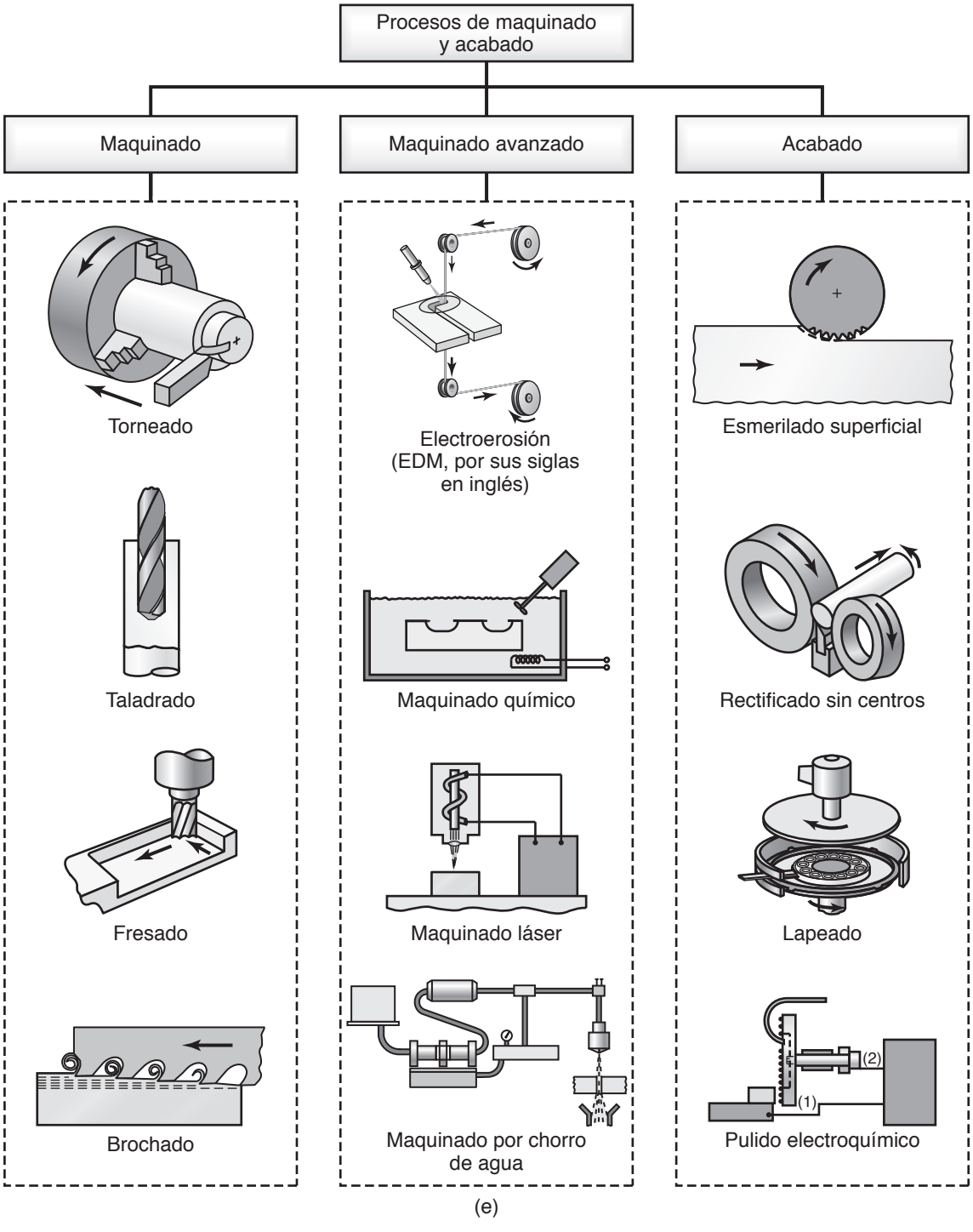


FIGURA I.5e Ilustraciones esquemáticas de varios procesos de maquinado y acabado.

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

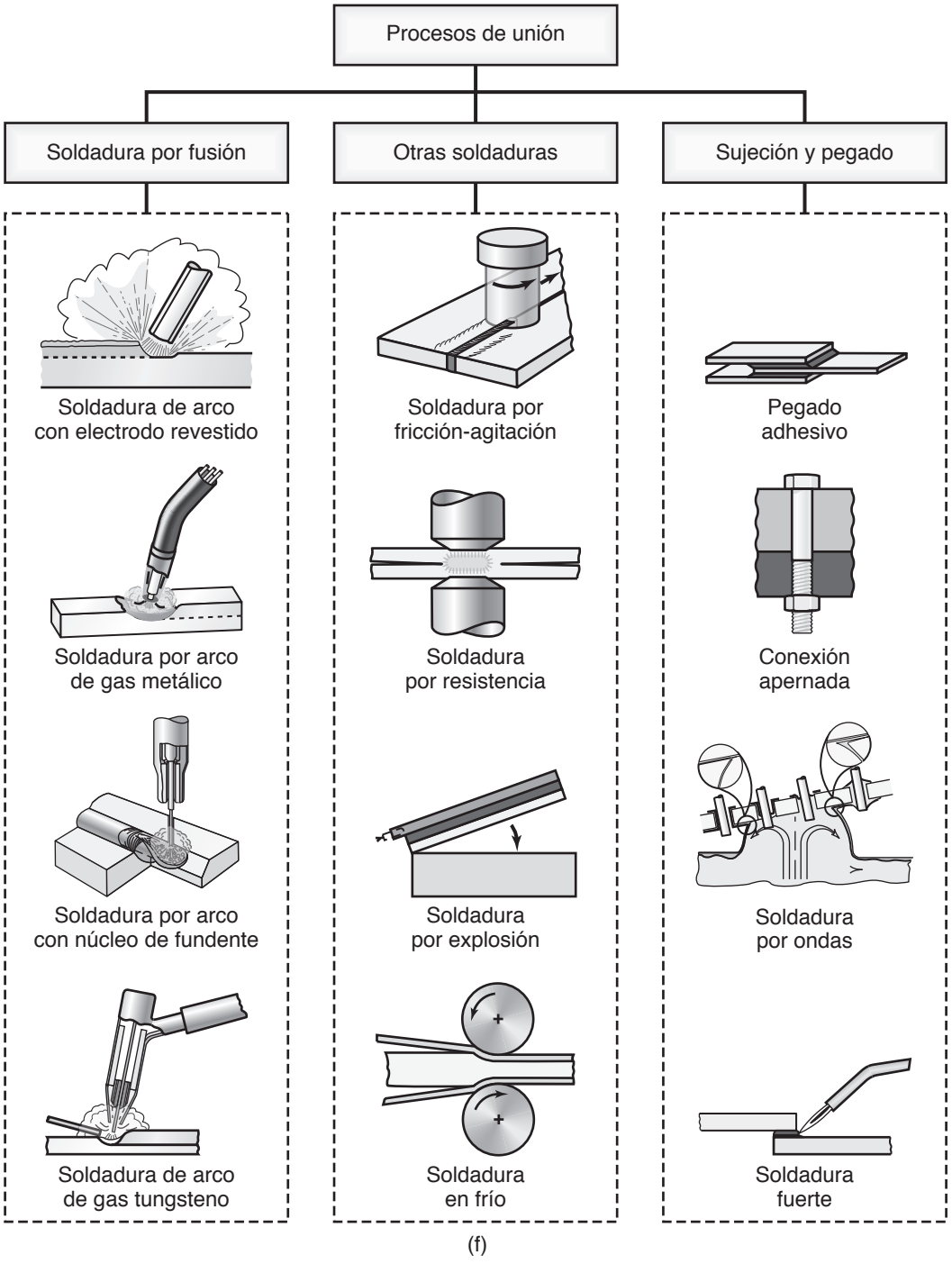


FIGURA 1.5f Ilustraciones esquemáticas de varios procesos de unión.

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

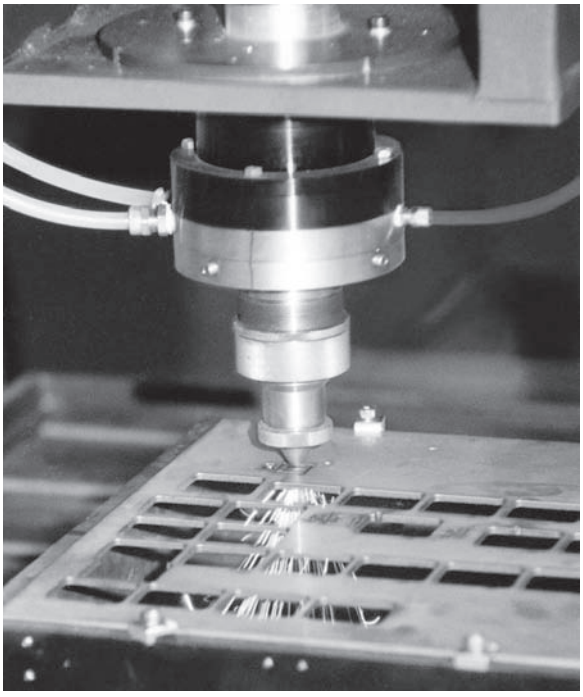
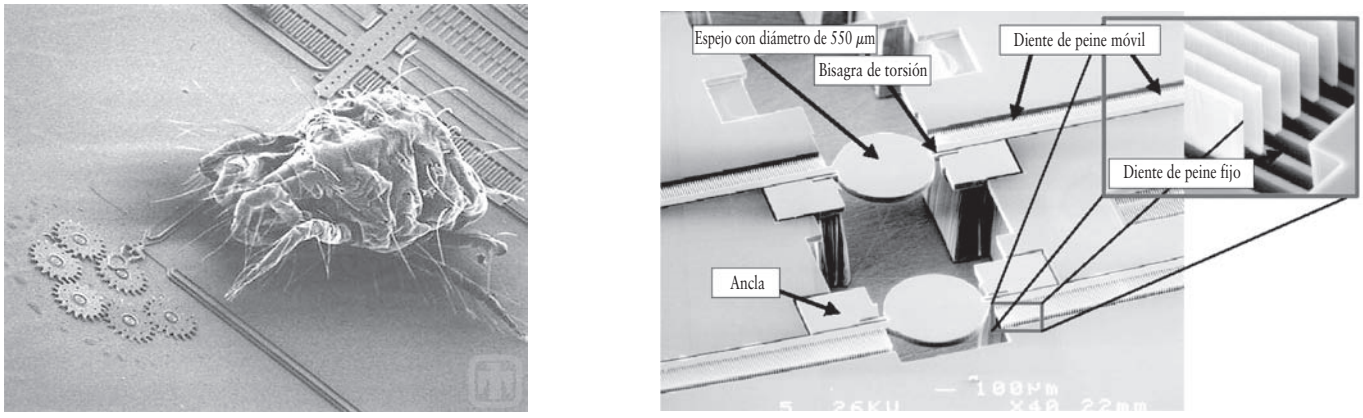


FIGURA I.6 Corte de hoja metálica mediante rayo láser. *Fuente:* Cortesía de Rofin-Sinar, Inc., y Society of Manufacturing Engineers.



(a) (b)

FIGURA I.7 (a) Engranajes microscópicos junto a un ácaro del polvo. *Fuente*: Cortesía del 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 moledores 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-

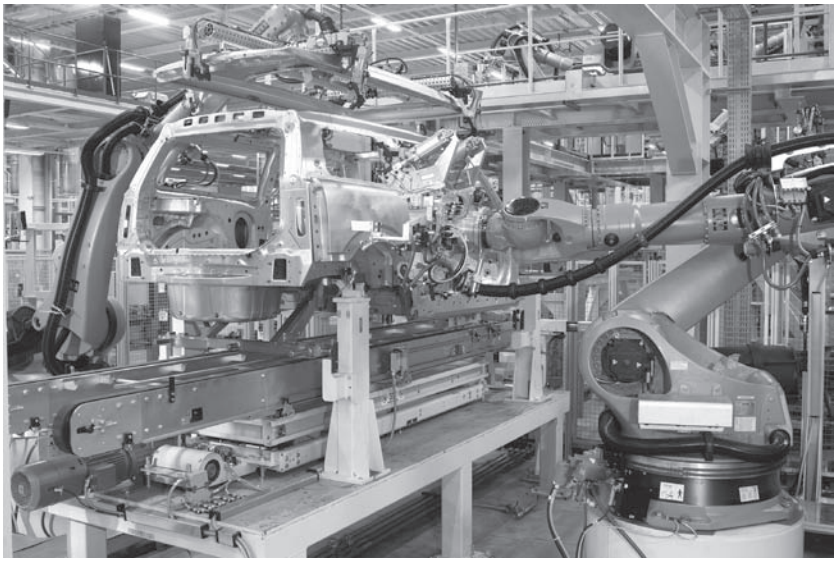


FIGURA I.9 Soldadura por puntos automatizada sobre carrocerías de automóvil en una línea de producción en masa.

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.

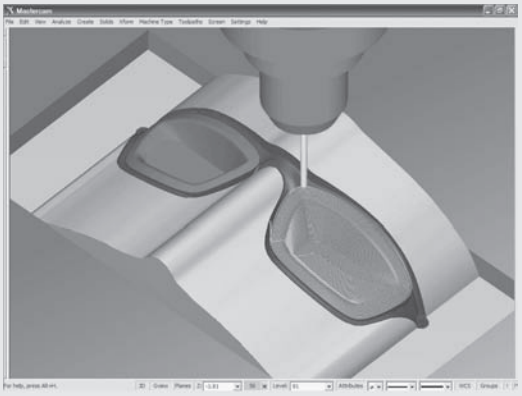
10. **Sistemas de manufactura flexible** (FMS, por sus siglas en inglés). Estos sistemas integran células de manufactura en una planta de producción grande, donde todas las células están interconectadas a una computadora central. Aunque tienen un alto costo, los sistemas de manufactura flexible son capaces 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.

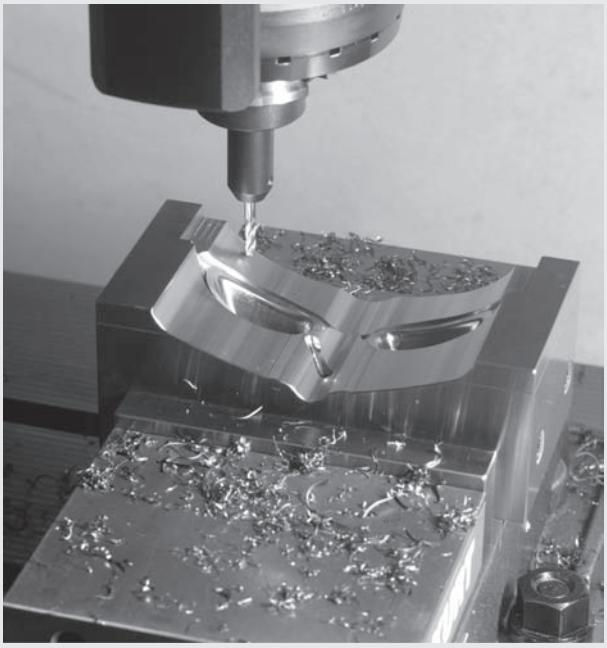
Fuente: Basado en Mastercam/CNC Software, Inc.



(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*)



(b)

(c)

FIGURA I.10 (*continuación*) (b) Maquinado de la cavidad del troquel utilizando una fresadora de control numérico por computadora. (C) Producto final fabricado a partir del molde. *Fuente:* Cortesía de Mastercam/CNC Software, Inc.

I.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.

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.

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.

TABLA I.5

Costo relativo de reparación en diversas etapas del desarrollo y la venta de los productos

Etapa	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

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-

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.

I.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.

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%

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.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

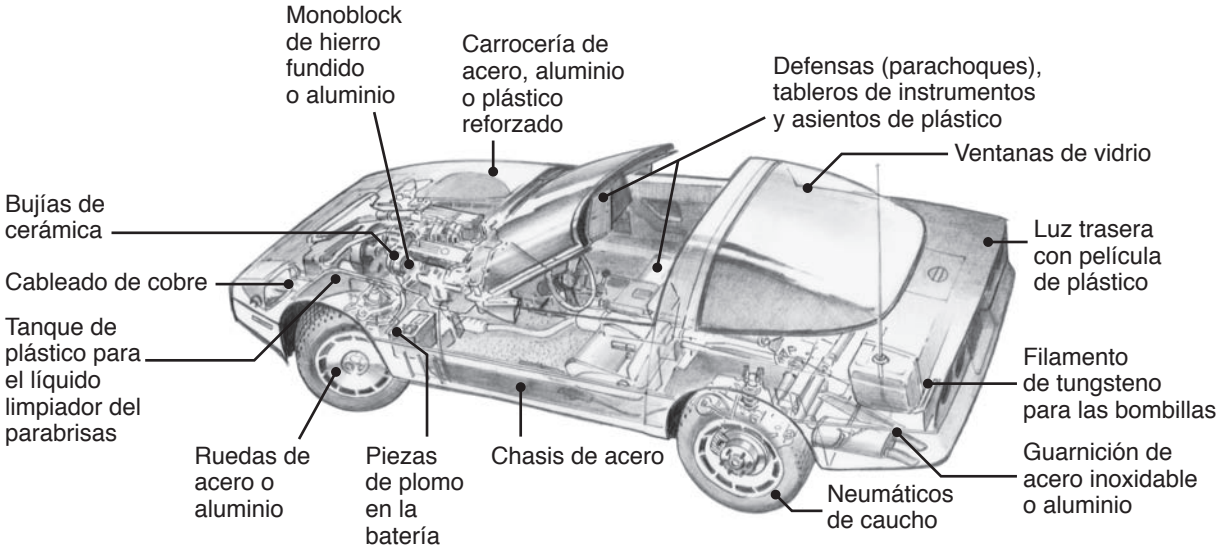


FIGURA I.1 Resumen de los temas descritos en la parte I de este libro.

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.

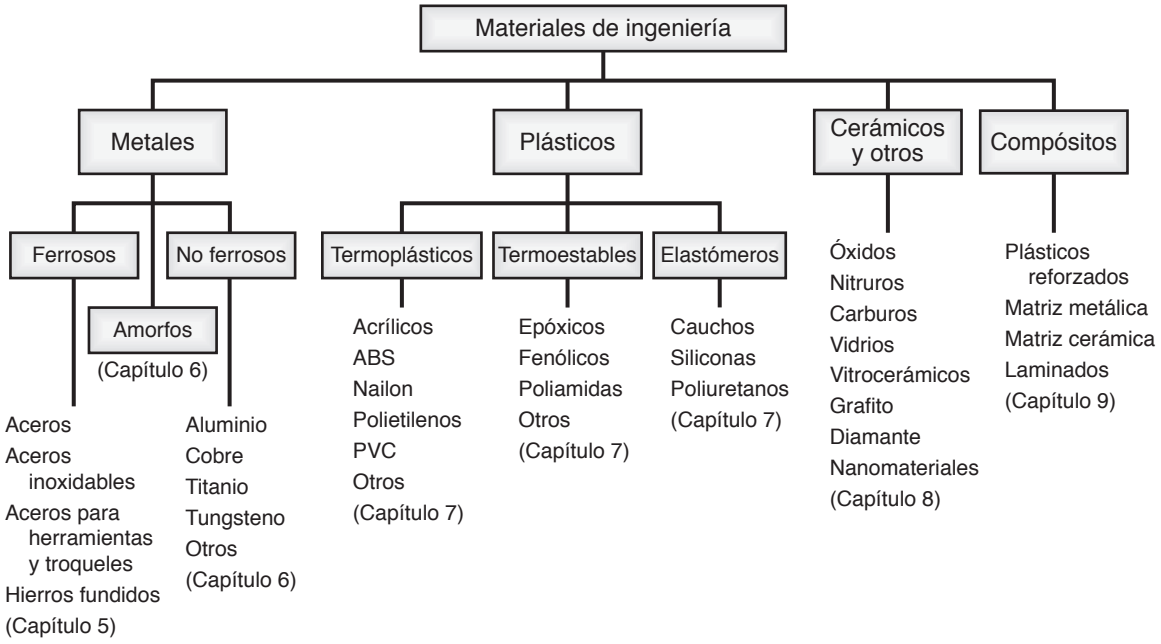


FIGURA I.2 Esquema de los materiales de ingeniería descritos en la parte I.

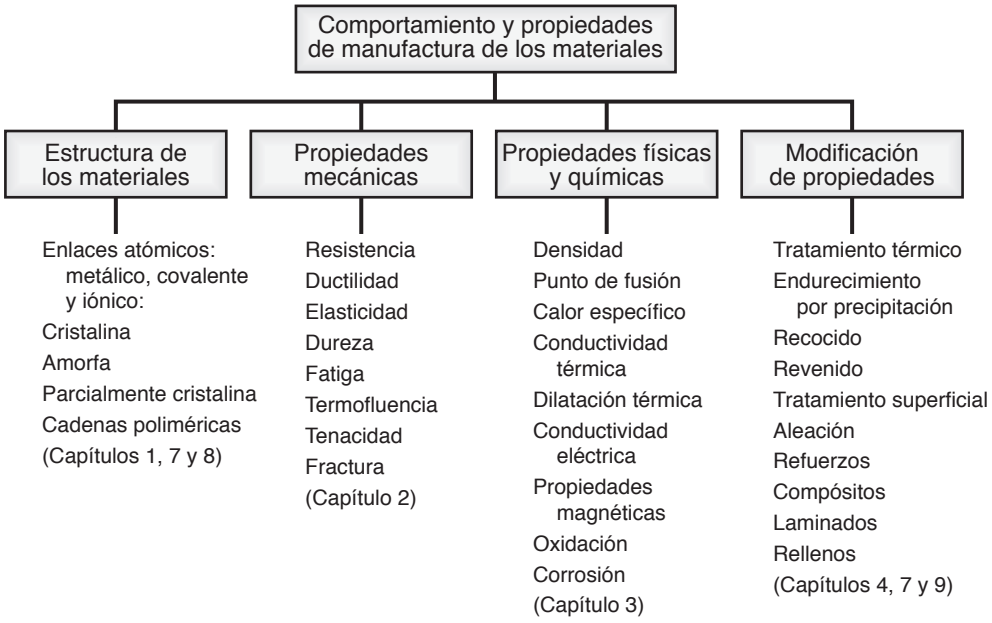


FIGURA I.3 Esquema del comportamiento y de las propiedades de manufactura de los materiales descritos en la parte I.

CAPÍTULO

1 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.

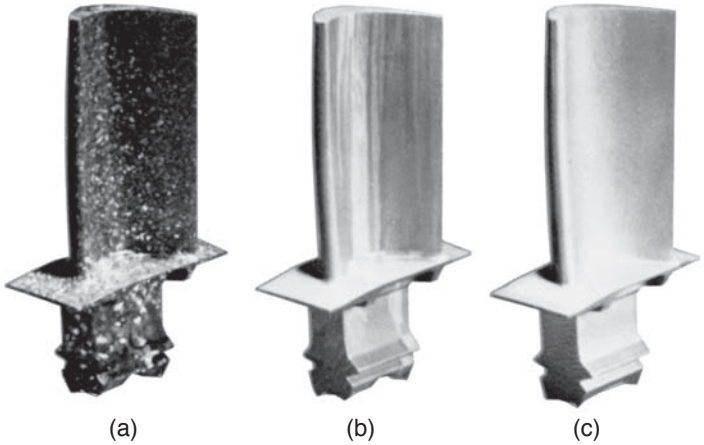


FIGURA 1.1 Álabes de turbina para motores a reacción fabricados mediante tres métodos diferentes: (a) fundidos convencionalmente, (b) solidificados direccionalmente, con granos columnares como puede verse en las franjas verticales, y (c) con monocristal. Aunque son más caros, a altas temperaturas los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

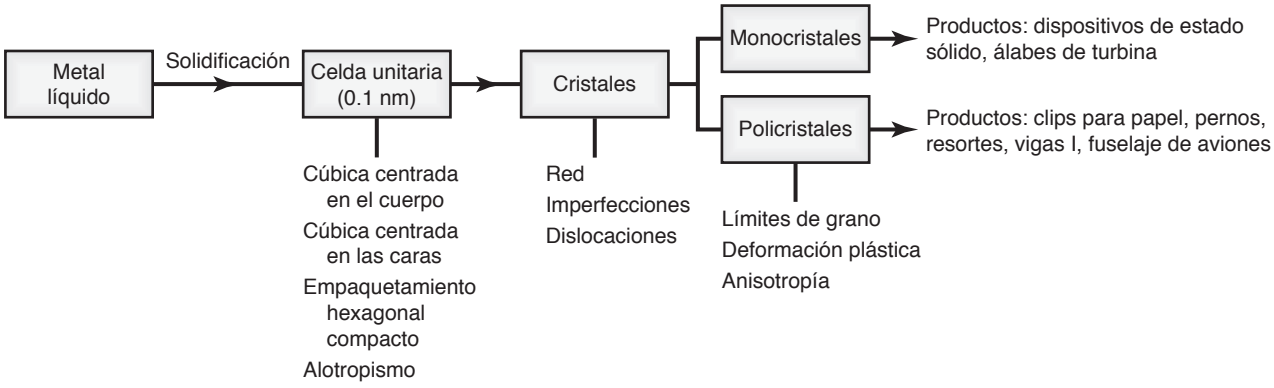


FIGURA 1.2 Esquema de los temas descritos en este capítulo.

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 **cristales**; 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

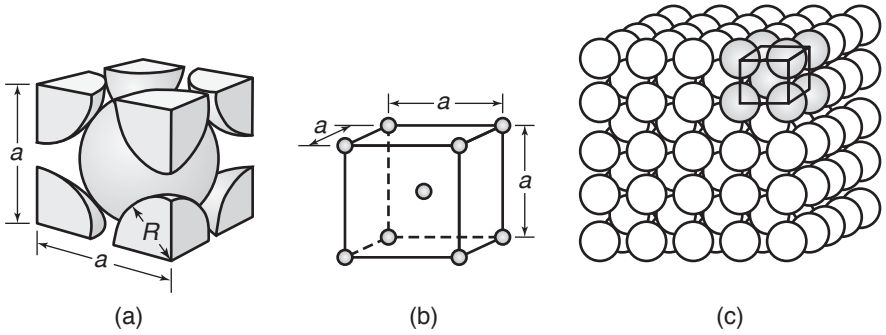


FIGURA 1.3 Estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (bcc): (a) modelo de esferas duras, (b) celda unitaria y (c) monocristal con muchas celdas unitarias.

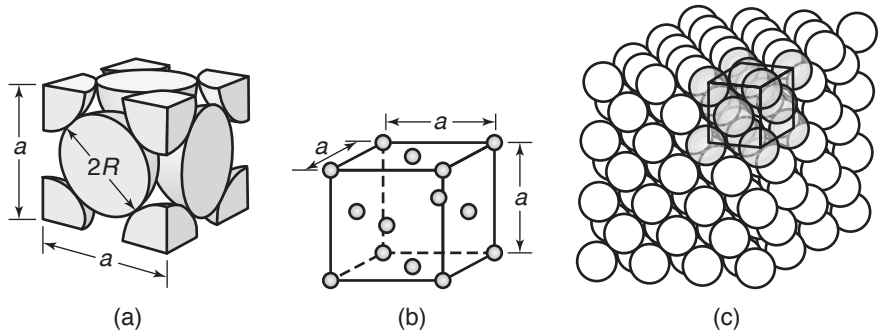


FIGURA 1.4 Estructura cristalina cúbica centrada en las caras (fcc): (a) modelo de esferas duras, (b) celda unitaria y (c) monocristal con muchas celdas unitarias.

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.

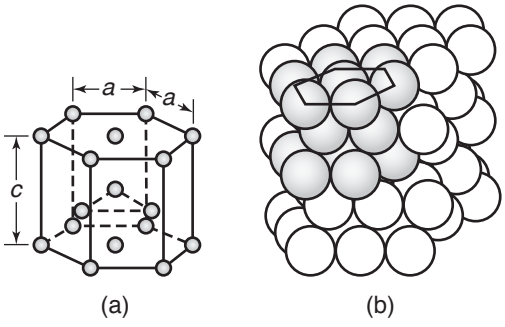


FIGURA 1.5 Estructura cristalina con empaquetado hexagonal compacto (hcp): (a) celda unitaria y (b) monocristal con muchas celdas unitarias.

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*

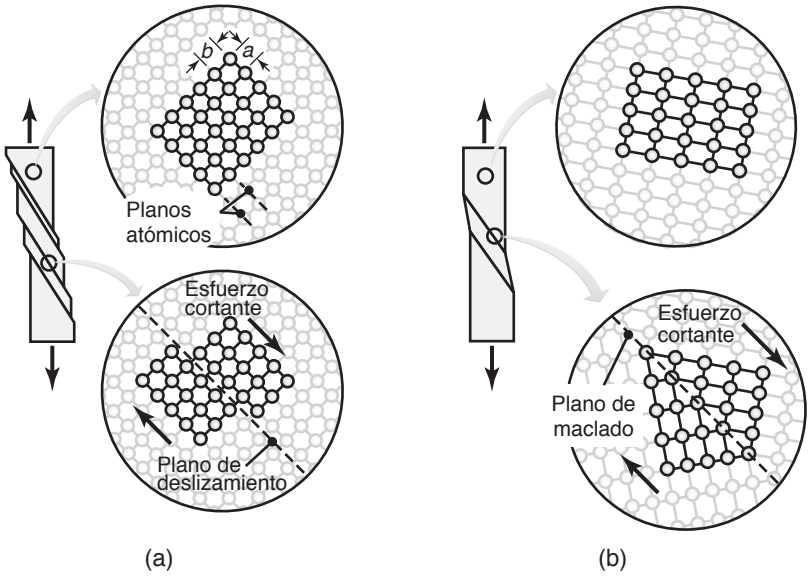


FIGURA 1.6 Deformación permanente de un monocristal bajo una carga de tensión; la malla de átomos resaltada enfatiza el movimiento que se produce dentro de la red. (a) Deformación por deslizamiento. La relación b/a influye en la magnitud del esfuerzo cortante requerido para causar deslizamiento. (b) 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).

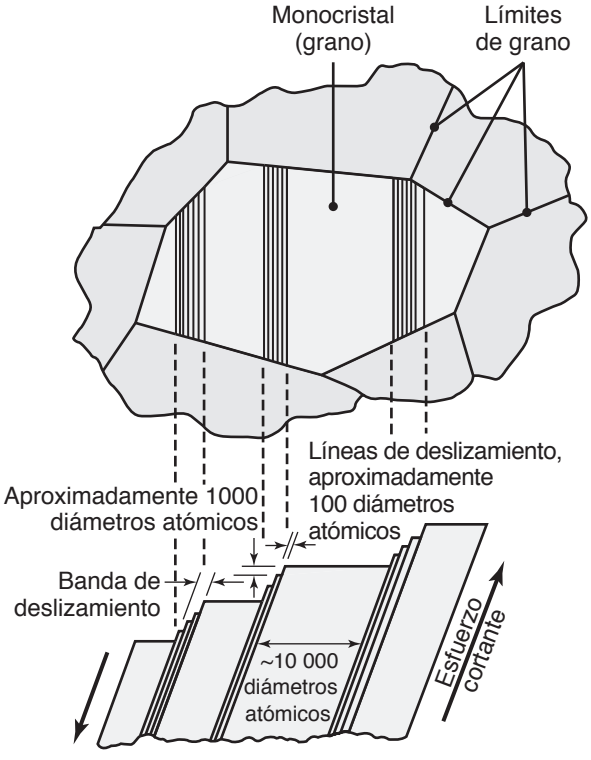


FIGURA 1.7 Ilustración esquemática de las líneas y las bandas de deslizamiento presentes en un monocristal (grano) sometido a esfuerzo cortante. Una banda de deslizamiento consiste en una serie de planos de deslizamiento. El cristal ubicado en el centro de la ilustración superior es un grano individual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

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

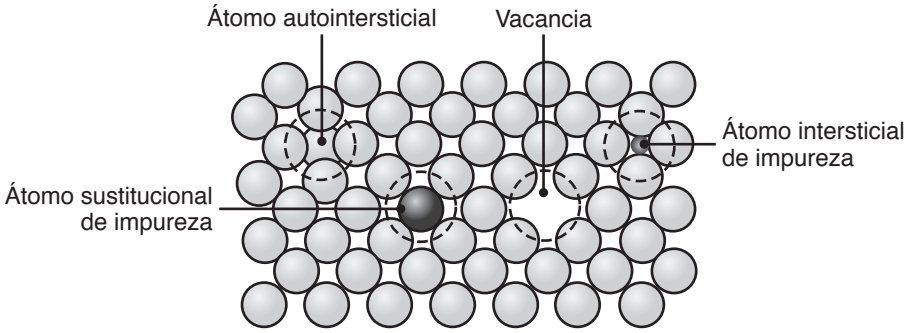


FIGURA 1.8 Ilustración esquemática de los tipos de defectos en una red de monocristal: autointersticial, vacancia, intersticial y sustitucional.

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.

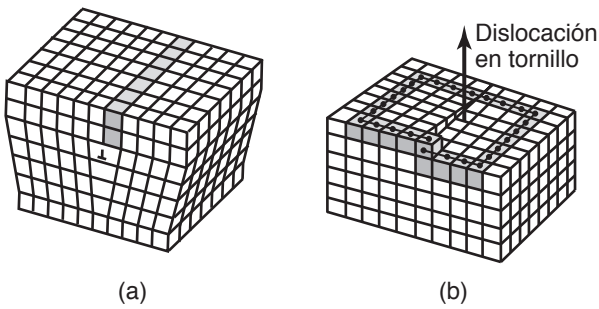


FIGURA 1.9 Tipos de dislocaciones en un monocristal: (a) dislocación de borde y (b) dislocación en tornillo.

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.

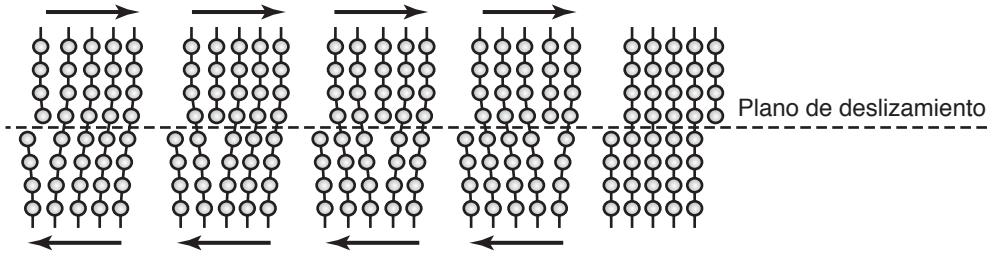


FIGURA 1.10 Movimiento de una dislocación de borde a través de la red cristalina bajo un esfuerzo cortante. Las dislocaciones ayudan a explicar por qué la resistencia real de los metales es mucho menor que la predicha en forma teórica.

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-

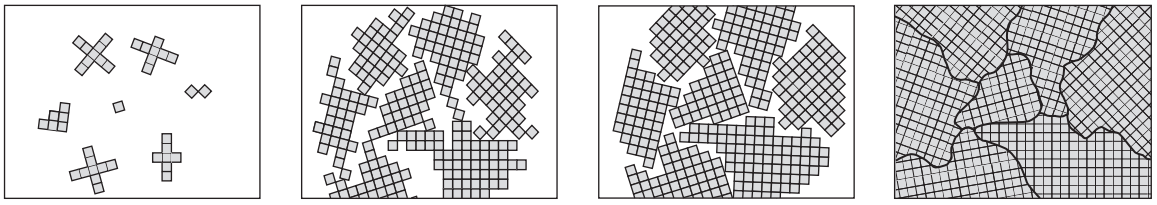


FIGURA 1.11 Ilustración esquemática de las etapas que tienen lugar durante la solidificación de metal fundido; cada pequeño cuadrado representa una célula unitaria. (a) Nucleación de cristales en sitios aleatorios en el metal fundido; observe que la orientación cristalográfica de cada sitio es diferente. (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*):

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

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 × (igual a 0.0645 mm^2 de área real) mediante la fórmula

$$N = 2^{n-1}. \tag{2}$$

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

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

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.

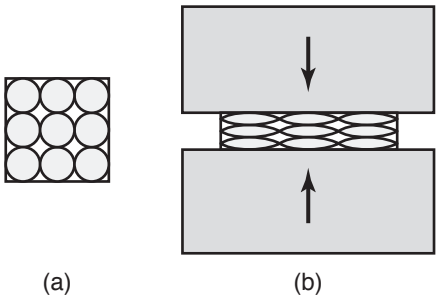


FIGURA 1.12 Deformación plástica de granos idealizados (equiaxiales) en un espécimen sometido a compresión (tal como ocurre en el forjado o laminado de metales): (a) antes de la deformación y (b) después de la deformación. Observe la alineación de los límites de grano a lo largo de la dirección horizontal,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

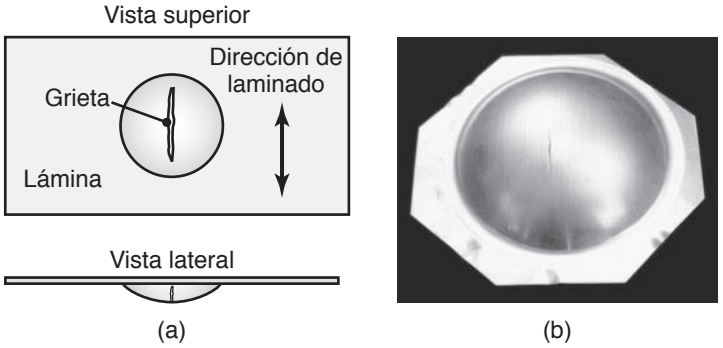


FIGURA 1.13 (a) Ilustración esquemática de una grieta en una lámina metálica que ha sido sometida a abombamiento (causado, por ejemplo, al empujar una bola de acero contra la lámina). Observe la orientación de la grieta con respecto a la dirección de la laminación; esta lámina es anisotrópica. (b) Lámina 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.

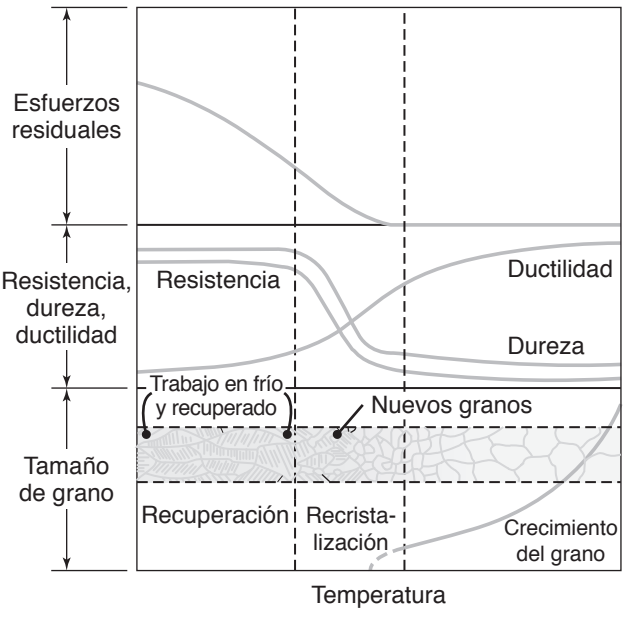


FIGURA 1.14 Ilustración esquemática de los efectos de la recuperación, la recristalización y el crecimiento del grano en las propiedades mecánicas y en la forma y el tamaño de los granos; observe la formación de pequeños nuevos granos durante la recristalización. *Fuente:* Según G. Sachs.

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

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 comprobación, se encuentra que la ampliación usada fue de 125×, en vez de 100× 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 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 experimento 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-

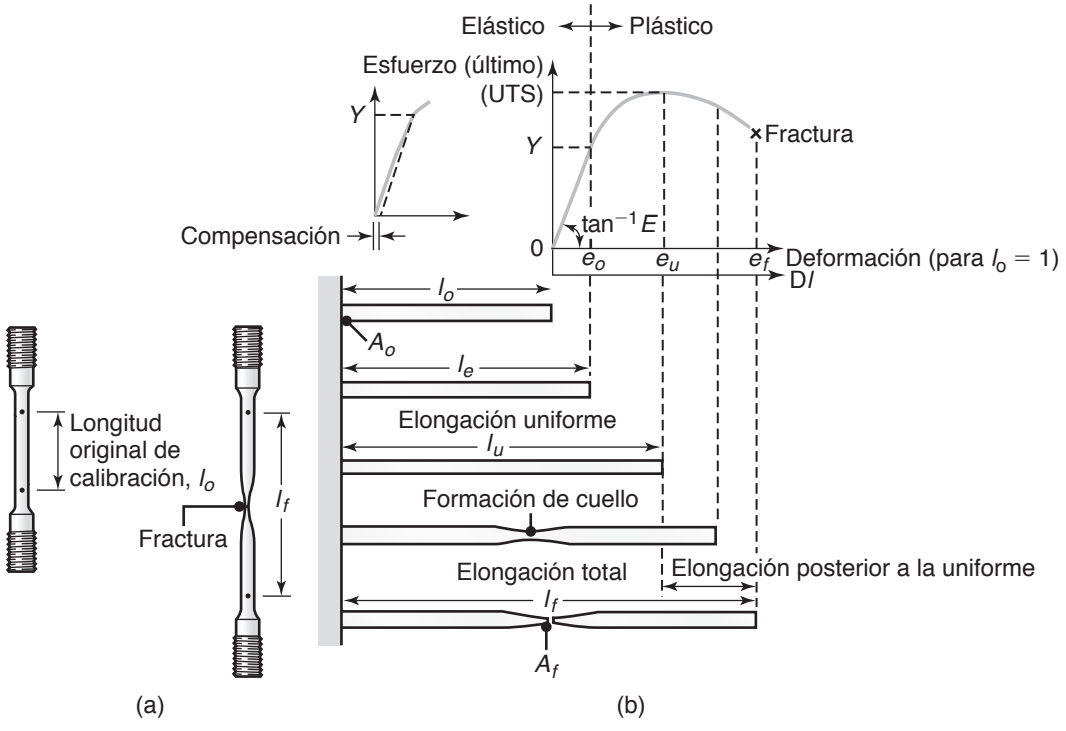


FIGURA 2.1 (a) Probeta estándar para ensayos de tensión, antes y después de ser estirada, que muestra las longitudes de calibración original y final. (b) Etapas del comportamiento de la probeta en un ensayo de tensión.

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:

$$\sigma = \frac{P}{A_o}. \tag{2.1}$$

La **deformación ingenieril** se define como

$$e = \frac{l - l_o}{l_o}, \tag{2.2}$$

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

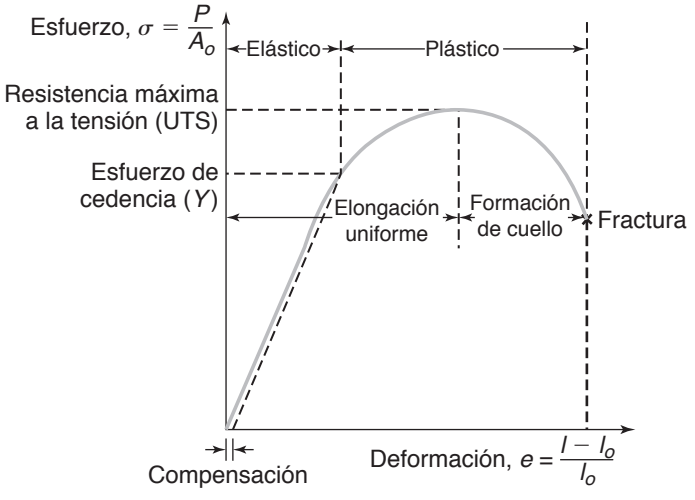


FIGURA 2.2 Curva de esfuerzo-deformación típica obtenida a partir de un ensayo de tensión mostrando varias características.

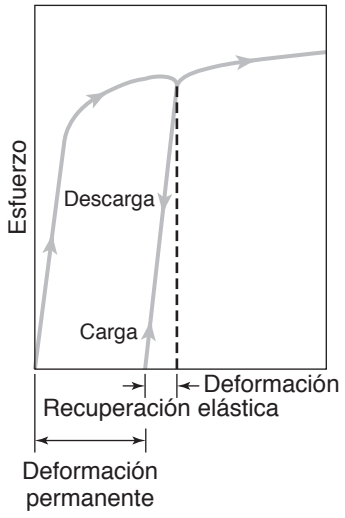


FIGURA 2.3 Ilustración esquemática de la carga y la descarga de una probeta para el ensayo de tensión. Observe que, durante la descarga, la curva sigue una trayectoria paralela a la pendiente elástica original.

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_2N_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 incremente 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):

$$E = \frac{\sigma}{e}. \tag{2.3}$$

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

$$\text{Elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100, \tag{2.4}$$

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

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

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:

$$\sigma = \frac{P}{A}. \tag{2.6}$$

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

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

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-

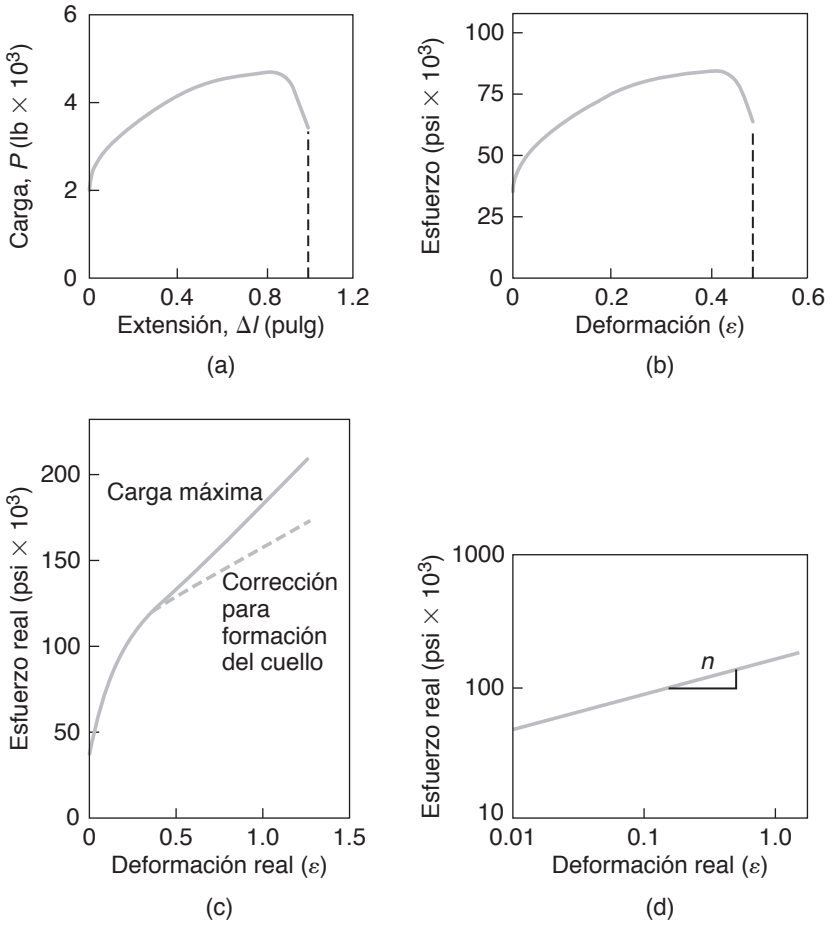


FIGURA 2.4 (a) Curva de carga-elongación en los ensayos de tensión de una probeta de acero inoxidable. (b) Curva de esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril elaborada a partir de los datos de la figura 2.4a. (c) Curva de esfuerzo real-deformación real elaborada a partir de los datos de la figura 2.4b. 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, $A_o = 0.056$ pulg^2 y $A_f = 0.016$ 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

$$\sigma = K\epsilon^n, \tag{2.8}$$

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*.

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-6A1-4V, recocido, 800 °C	350	0.146

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

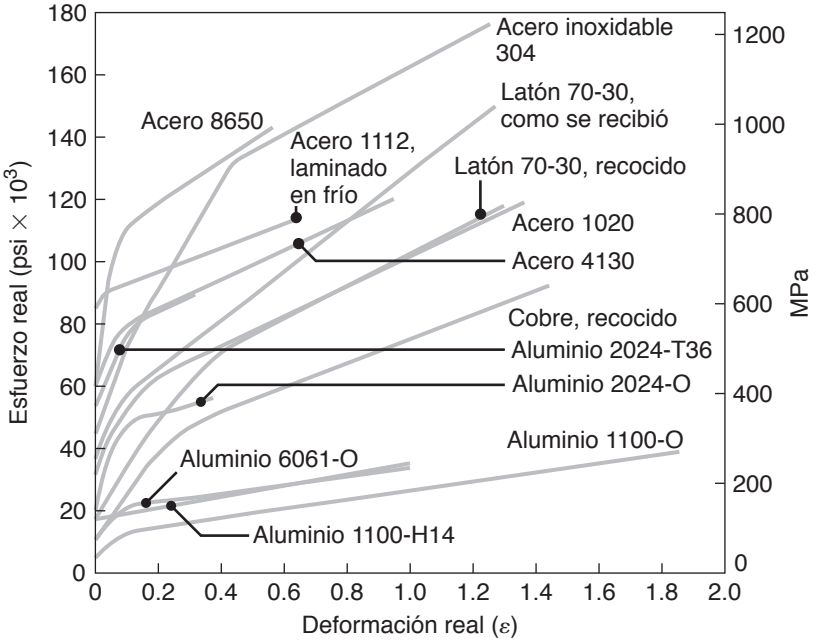


FIGURA 2.5 Curvas de esfuerzo real-deformación real en tensión, a temperatura ambiente, para varios metales; las curvas empiezan en un nivel finito de esfuerzo. Las regiones elásticas tienen una pendiente demasiado inclinada para poder mostrarse en esta figura; por lo tanto, cada curva comienza en el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

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

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 $= P/A_o$,

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

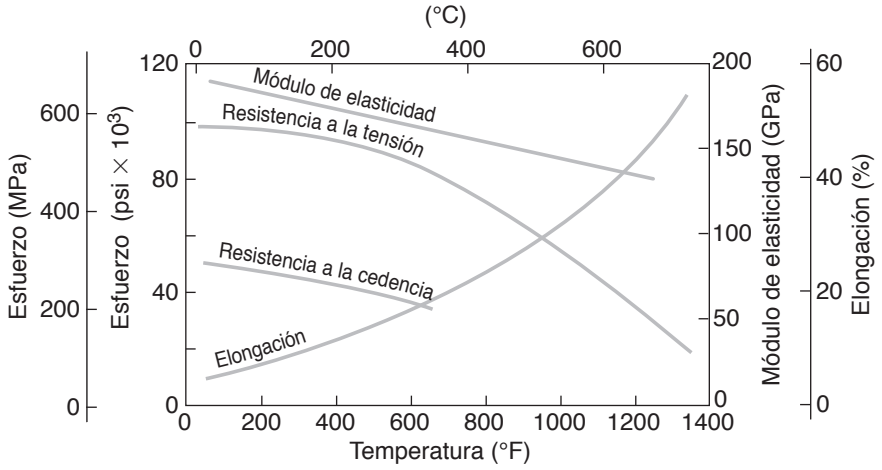


FIGURA 2.6 Efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de un acero al carbono; la mayoría de los materiales muestran sensibilidades a la temperatura similares para el módulo de elasticidad, la resistencia a la cedencia, la resistencia máxima a la tensión y la ductilidad.

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):

a. La ductilidad y la tenacidad aumentan.
b. 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}

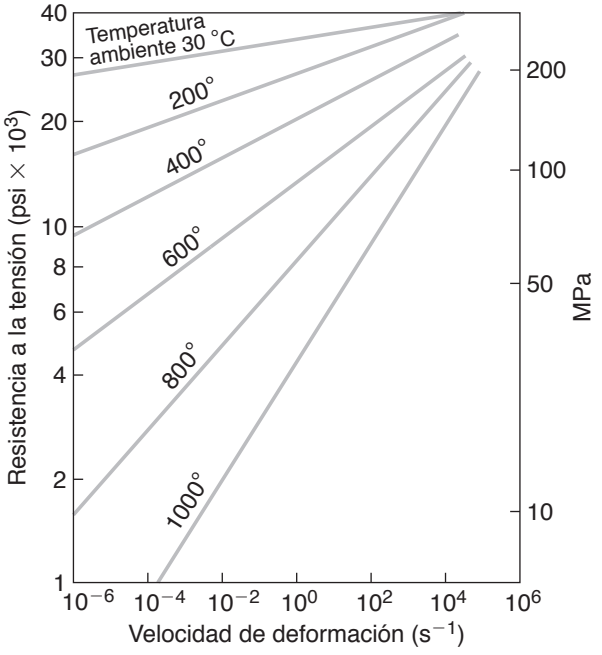


FIGURA 2.7 Efecto de la velocidad de deformación en la resistencia máxima a la tensión del aluminio. Observe que, al aumentar la temperatura, las pendientes de las curvas se incrementan; así que la resistencia se vuelve cada vez más sensible a la velocidad de deformación a medida que aumenta la temperatura.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

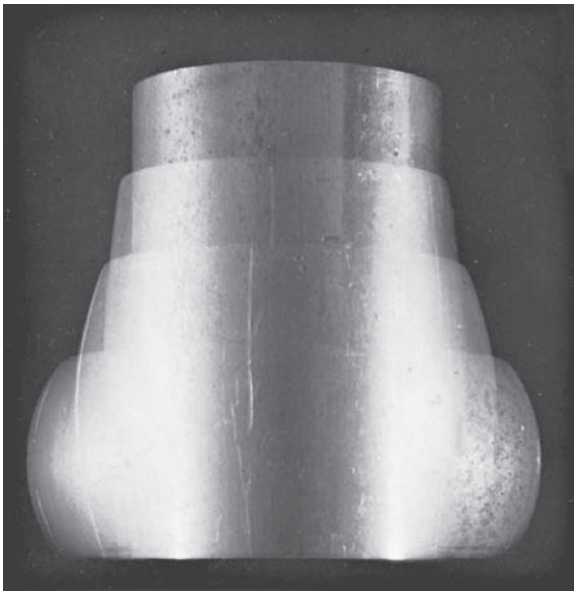


FIGURA 2.8 Abarrilamiento debido a la compresión de una muestra cilíndrica sólida redonda (aluminio 7075-O) entre troqueles planos. El abarrilamiento se debe a la fricción que hay en las interfaces entre los dados y la muestra, lo que retarda el flujo libre del material (vea también la figura 14.3).

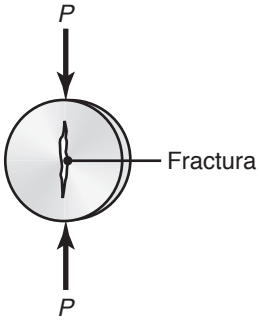


FIGURA 2.9 Prueba de disco en un material frágil mostrando la dirección de la carga y la trayectoria de la fractura.

sos 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 recalcado (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

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

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.

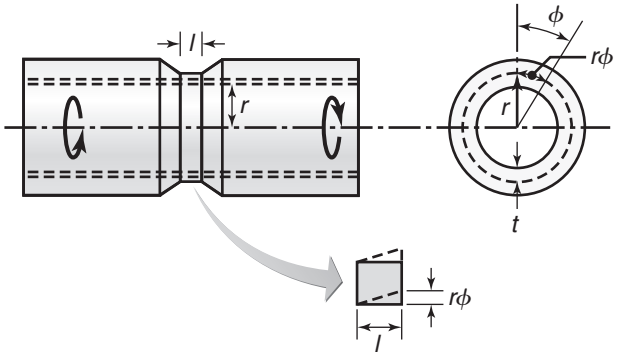


FIGURA 2.10 Probeta típica para un ensayo de torsión; ésta se monta entre los dos cabezales de la máquina de ensayo y se gira; observe la deformación cortante de un elemento en la sección reducida de la probeta.

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.

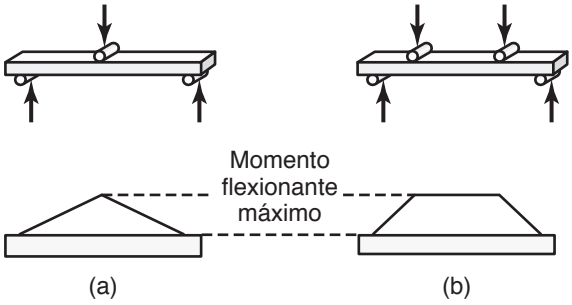


FIGURA 2.11 Dos métodos de prueba para la flexión de materiales frágiles: (a) flexión de tres puntos y (b) flexión de cuatro puntos. Las áreas que están sobre las vigas representan los diagramas de momento flexionante descritos en textos de mecánica de sólidos. Observe la región del momento flexionante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

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.

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

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

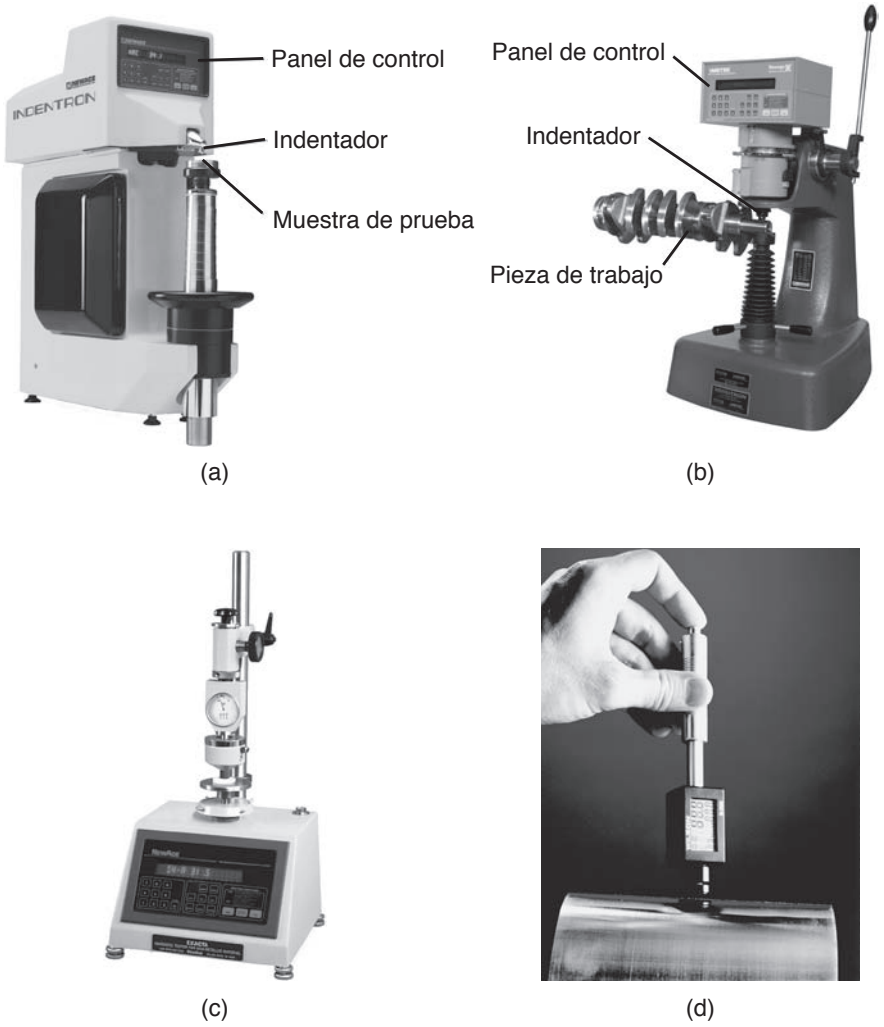


FIGURA 2.12 Selección de probadores de dureza. (a) Probador de dureza Micro Vickers, (b) probador de dureza Rockwell (se ha retirado el soporte de la pieza para mayor claridad), (c) durómetro y (d) probador Leeb. *Fuente:* (a) a (c), cortesía de Newage Testing Instruments, Inc., (d) cortesía de Wilson®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

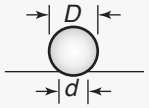
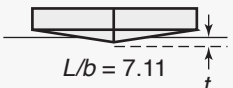
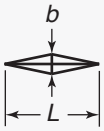
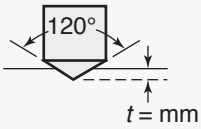
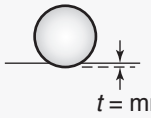
Prueba (Ensayo)	Indentador	Forma de la indentación: Vista lateral	Forma de la indentación: Vista superior	Carga, *P*	Número de dureza
Brinell	Bola de acero o de carburo de tungsteno de 10 mm			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D)\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$
Vickers	Pirámide de diamante			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

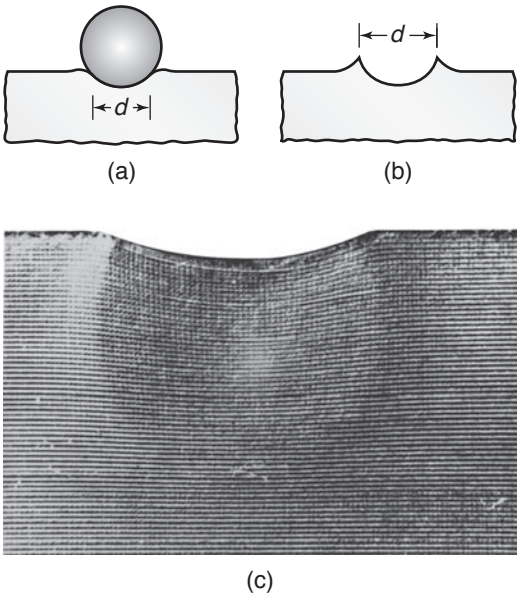


FIGURA 2.14 Geometría de indentación en el ensayo de dureza Brinell: (a) metal recocido, (b) metal endurecido por trabajo y (c) deformación de acero suave bajo un indentador esférico. Note que la profundidad de la zona deformada de manera permanente es de aproximadamente un orden de magnitud mayor que 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

$$\text{UTS} = 3.5(\text{HB}), \tag{2.14}$$

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

$$\text{UTS} = 500(\text{HB}), \tag{2.15}$$

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 GPa $= 30 \times 10^6$ psi para el acero. Por lo tanto,

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

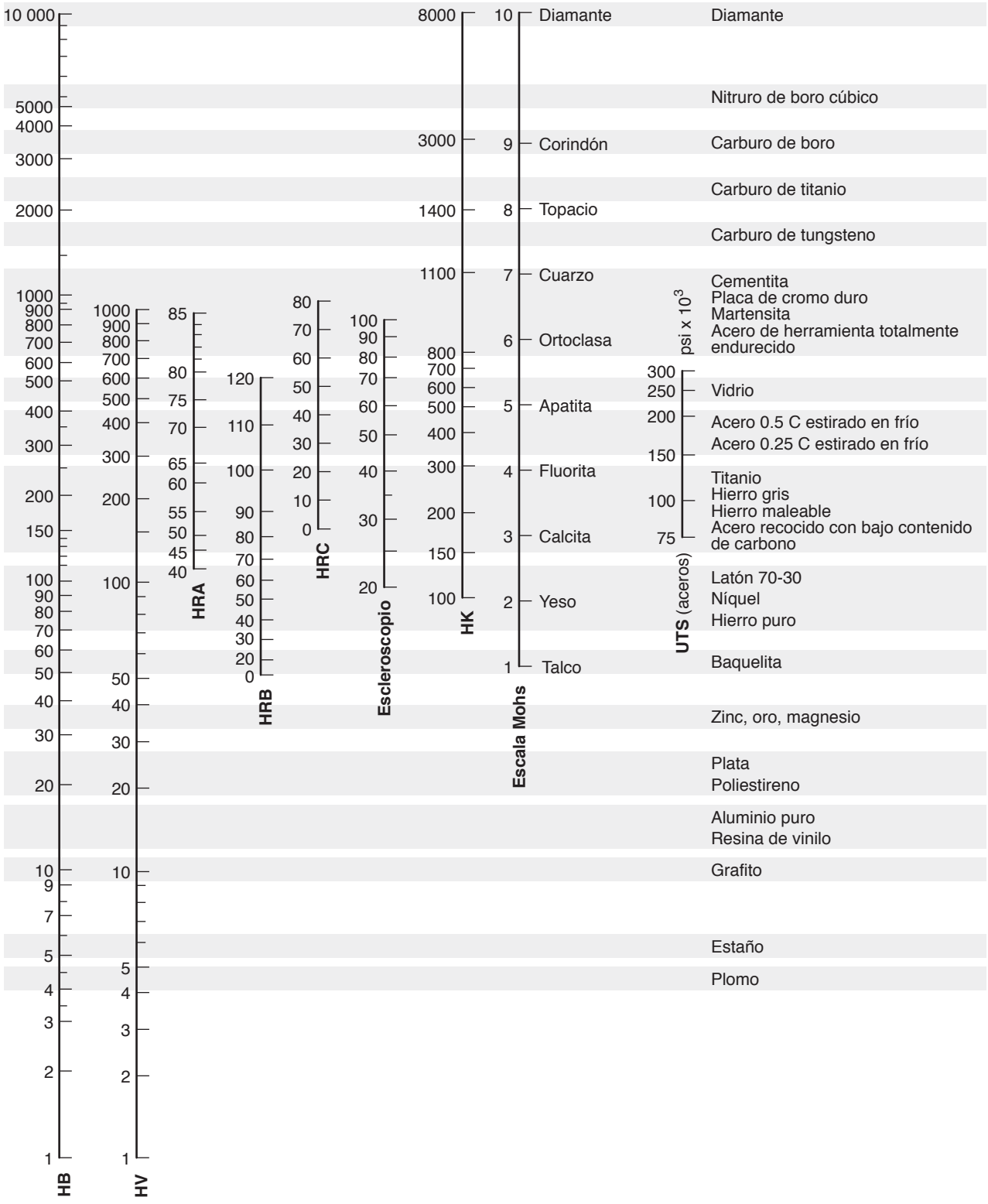


FIGURA 2.15 Diagrama para la conversión de varias escalas de dureza; observe el rango limitado de la mayoría de las escalas. Debido a los muchos factores involucrados, estos valores son aproximados.

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 reciprocantes, (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

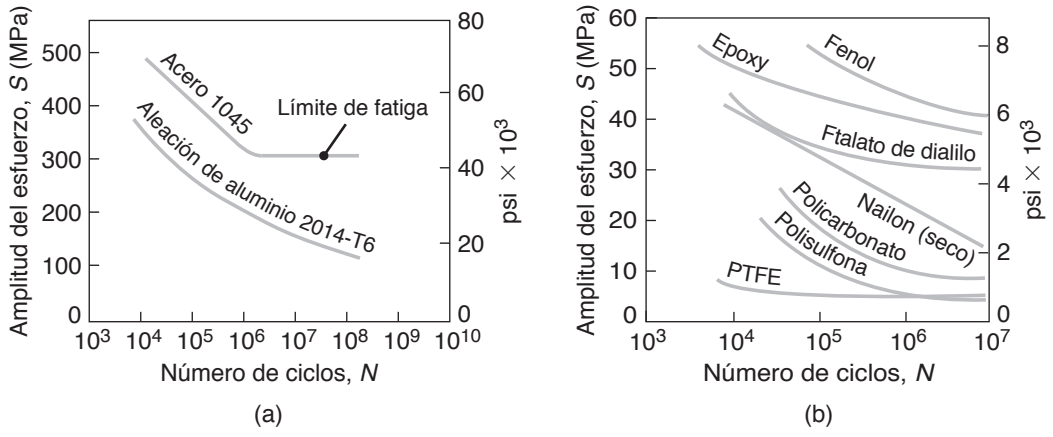


FIGURA 2.16 (a) Curvas S-N típicas para dos metales; observe que, a diferencia del acero, el aluminio no tiene un límite de fatiga. (b) Curvas S-N para algunos polímeros.

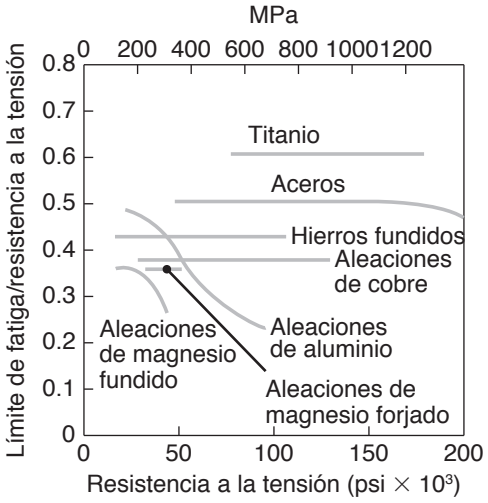


FIGURA 2.17 Relación del límite de fatiga sobre la resistencia a la tensión, para diversos metales, como una función de la resistencia a la tensión. Debido a que el aluminio no tiene un límite de fatiga, las correlaciones para el aluminio se basan en un número específico de ciclos, como se ve en la figura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

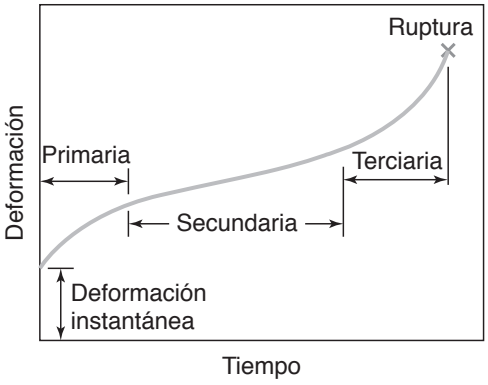


FIGURA 2.18 Ilustración esquemática de una curva típica de termofluencia; el segmento lineal de la curva (secundaria) se usa en el diseño de componentes para una vida específica en termofluencia.

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 ingeniril 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

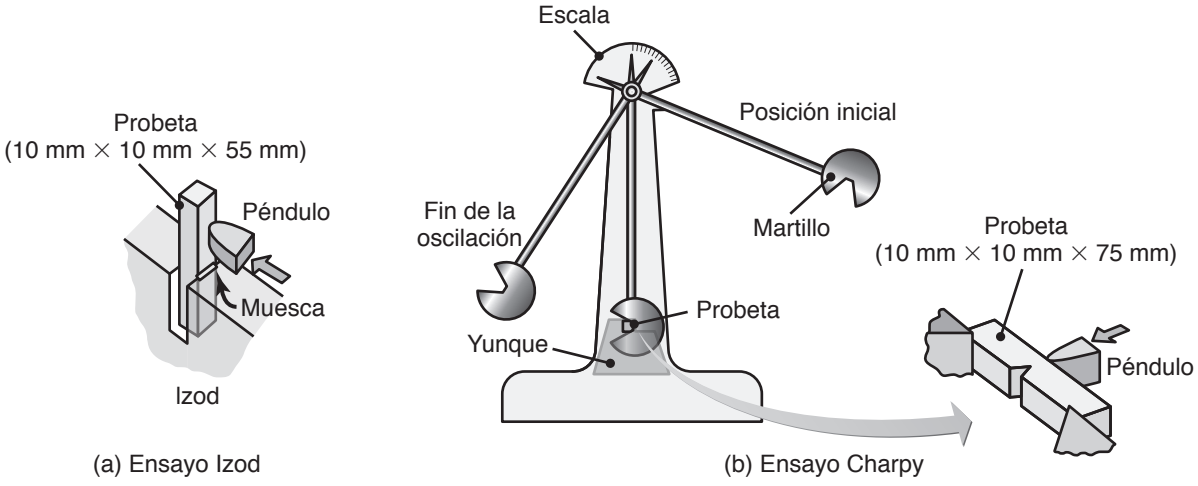


FIGURA 2.19 Probetas para ensayos de impacto.

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.

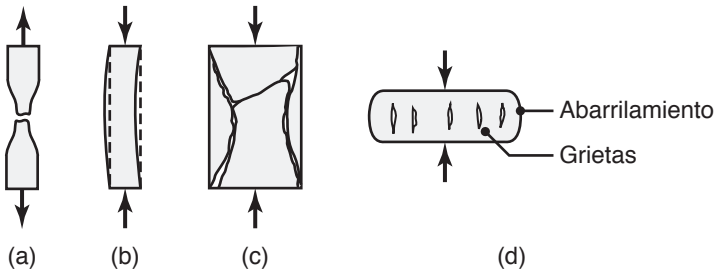


FIGURA 2.20 Ilustración esquemática de los tipos de falla en los materiales: (a) formación de cuello y fractura de los materiales dúctiles, (b) pandeo de los materiales dúctiles bajo una carga de compresión, (c) fractura de los materiales frágiles en compresión y (d) formación de grietas en la superficie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

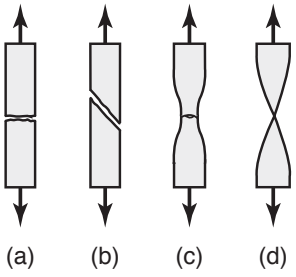


FIGURA 2.21 Ilustración esquemática de los tipos de fractura en tensión: (a) fractura frágil en metales policristalinos; (b) fractura cortante en monocristales dúctiles —vea también la figura 1.6a—; (c) fractura dúctil en copa y cono de metales policristalinos y (d) fractura dúctil completa en metales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

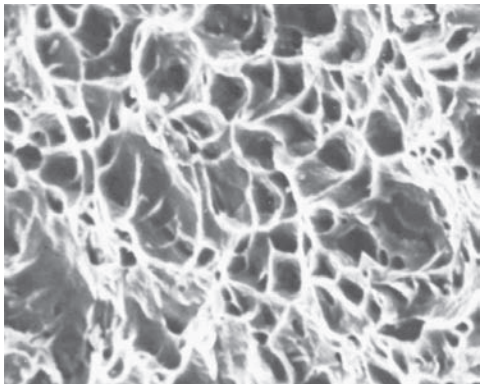


FIGURA 2.22 Superficie de fractura dúctil en acero al bajo carbono mostrando hoyuelos. La fractura suele iniciar en impurezas, inclusiones o huecos preexistentes (microporosidad) en el metal. *Fuente:* Cortesía de K.-H. Habig y D. Klaffke.

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.

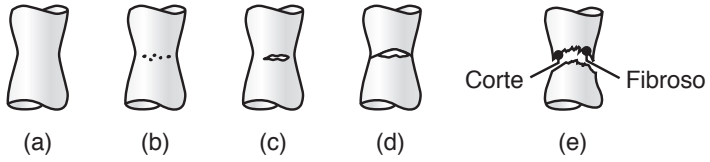


FIGURA 2.23 Secuencia de eventos en la formación del cuello y la fractura de una probeta para ensayo de tensión: (a) primera etapa de formación del cuello; (b) comienzan a formarse pequeños huecos dentro de la región del cuello; (c) los huecos coalescen, produciendo una grieta interna; (d) el resto de 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).

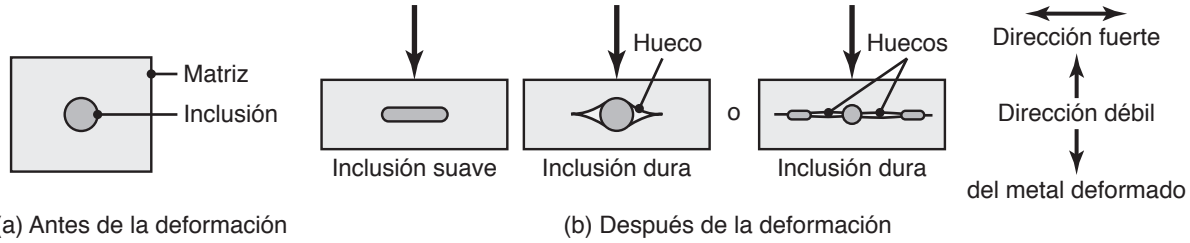


FIGURA 2.24 Ilustración esquemática de la deformación de inclusiones blandas y duras y de su efecto sobre la formación de huecos en la deformación plástica. Observe que, debido a que no se ajustan a la deformación total de la matriz dúctil, las inclusiones duras pueden causar huecos internos.

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.

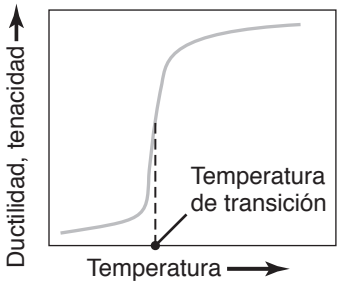


FIGURA 2.25 Ilustración esquemática de la temperatura de transición en los metales.

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.

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-

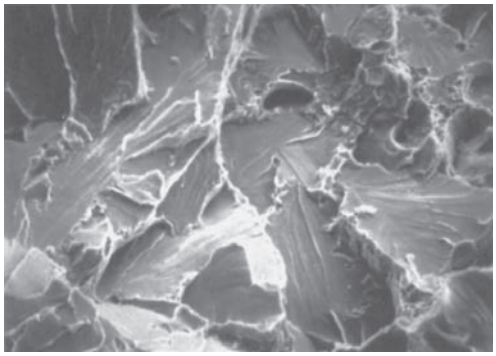


FIGURA 2.26 Superficie de fractura de un acero que ha fallado de manera frágil; la trayectoria de fractura es transgranular (a través de los granos). Ampliación: 200×. *Fuente:* Cortesía de B. J. Schulze y S. L. Meiley y de Packer Engineering Associates, Inc.

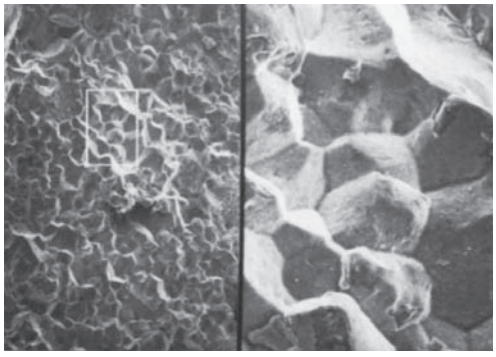


FIGURA 2.27 Fractura intergranular con dos ampliaciones diferentes; los granos y los límites de grano son claramente visibles en esta micrografía. La fractura sigue una trayectoria a lo largo de los límites de grano. Ampliación: izquierda, 100×; derecha, 500×. *Fuente:* Cortesía de B. J. Schulze y S. 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 suceptibles 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×), 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.

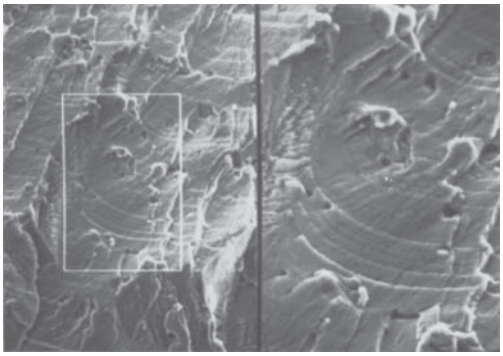


FIGURA 2.28 Superficie metálica típica con fractura por fatiga y que muestra marcas de playa. Magnificación: izquierda, 500×; derecha, 1000×. *Fuente:* Cortesía de B. J. Schulze y S. L. Meiley y de Packer Engineering Associates, Inc.

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 inoxidables 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.

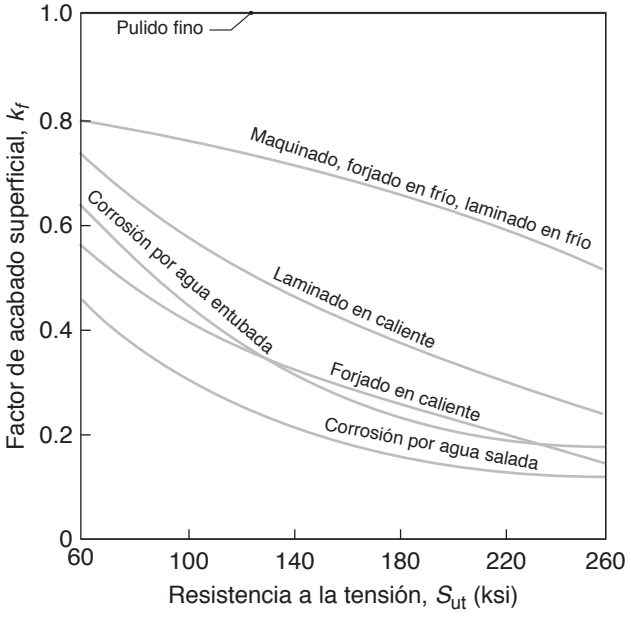


FIGURA 2.29 Reducciones en la resistencia a la fatiga de aceros fundidos sometidos a diversas operaciones de acabado superficial. Observe que la reducción se vuelve mayor a medida que aumenta la rugosidad superficial y la resistencia del acero. *Fuente:* Reimpreso con autorización de CRC Press, Inc.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

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 limpiado 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.

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.

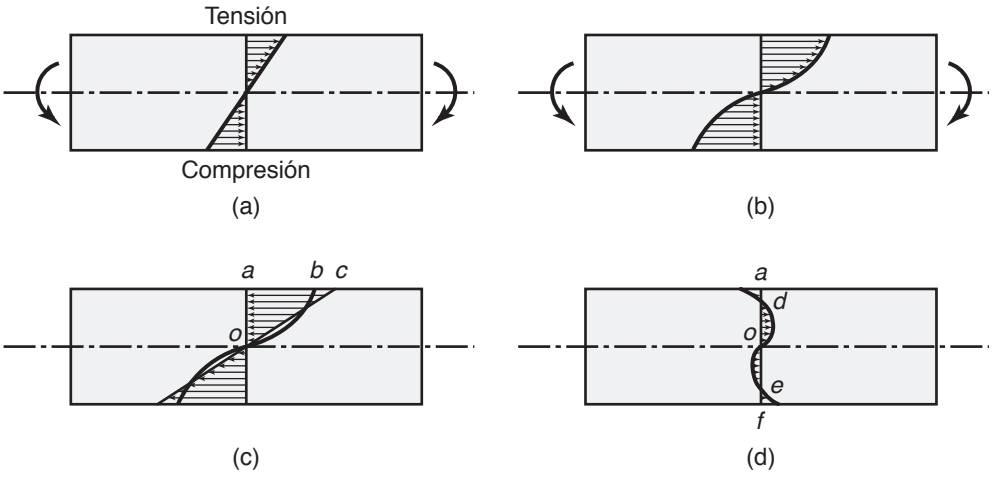


FIGURA 2.30 Esfuerzos residuales desarrollados al doblar una viga con sección transversal rectangular; observe que las fuerzas horizontales y los momentos causados por los esfuerzos residuales en la viga deben equilibrarse internamente. Debido a la deformación no uniforme, especialmente durante las operaciones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

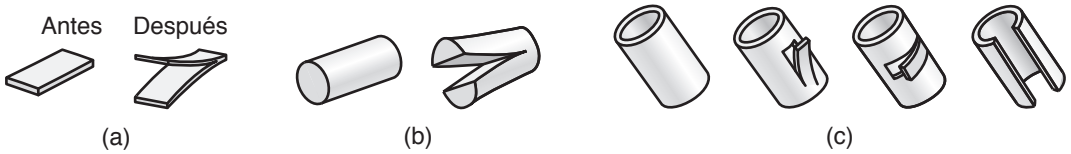


FIGURA 2.31 Distorsión de piezas con esfuerzos residuales después de cortar o ranurar: (a) hoja plana o placa, (b) barra redonda sólida y (c) tubería o tubos de pared delgada.

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

$$\Delta T = \frac{u}{\rho c}, \tag{2.16}$$

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

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 desdoblan 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 probablemente 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:

- **a.** Nitruro de boro cúbico.
- **b.** Plomo.
- **c.** Acero estirado en frío 0.5% C.
- **d.** Diamante.
- **e.** Caramelo.
- **f.** 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, $n = 0.5$, $A_o = 0.6$ pulg^2;

para el material B, $K = 30\,000$ psi, $n = 0.5$, $A_o = 0.3$ pulg^2.

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 μm, ¿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? 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* somete 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 pulg^2 y las longitudes originales son $a = 8$ pulg y $b = 4.5$ 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.

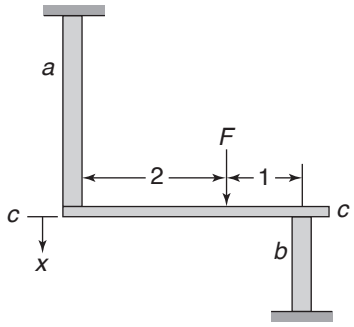


FIGURA P2.75

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).

CAPÍTULO

3 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)	Coeficiente de dilatación térmica ($\mu m/m$-°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	$2.8\text{-}4.0 \times 10^{-8}$
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	$1.7\text{-}5.9 \times 10^{-8}$
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	$20.6\text{-}24 \times 10^{-8}$
Magnesio	1745	650	1025	154	26.0	4.5×10^{-8}
Aleaciones de magnesio	1770	610-621	1046	75-138	26.0	$4.5\text{-}15.9 \times 10^{-8}$
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	$6.2\text{-}110 \times 10^{-8}$
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	$40\text{-}171 \times 10^{-8}$
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	$6.06\text{-}6.89 \times 10^{-8}$
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

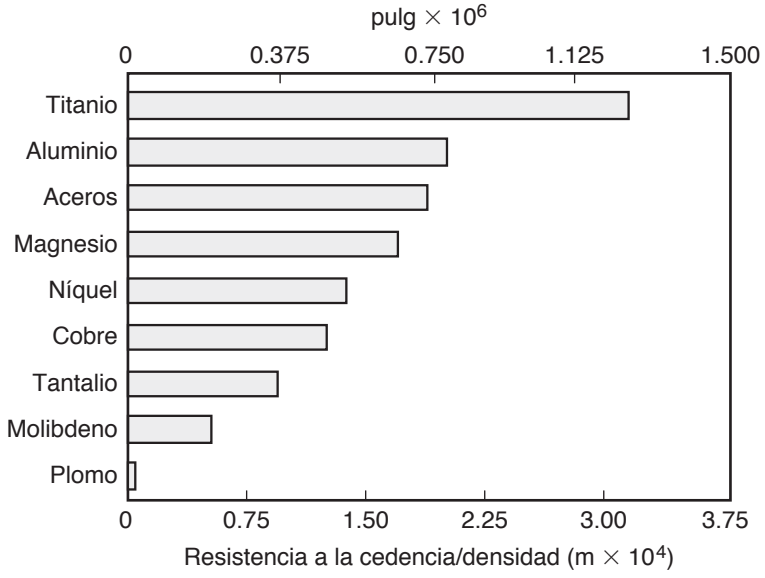


FIGURA 3.1 Relación del esfuerzo de cedencia máximo sobre la densidad para las aleaciones metálicas seleccionadas.

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).

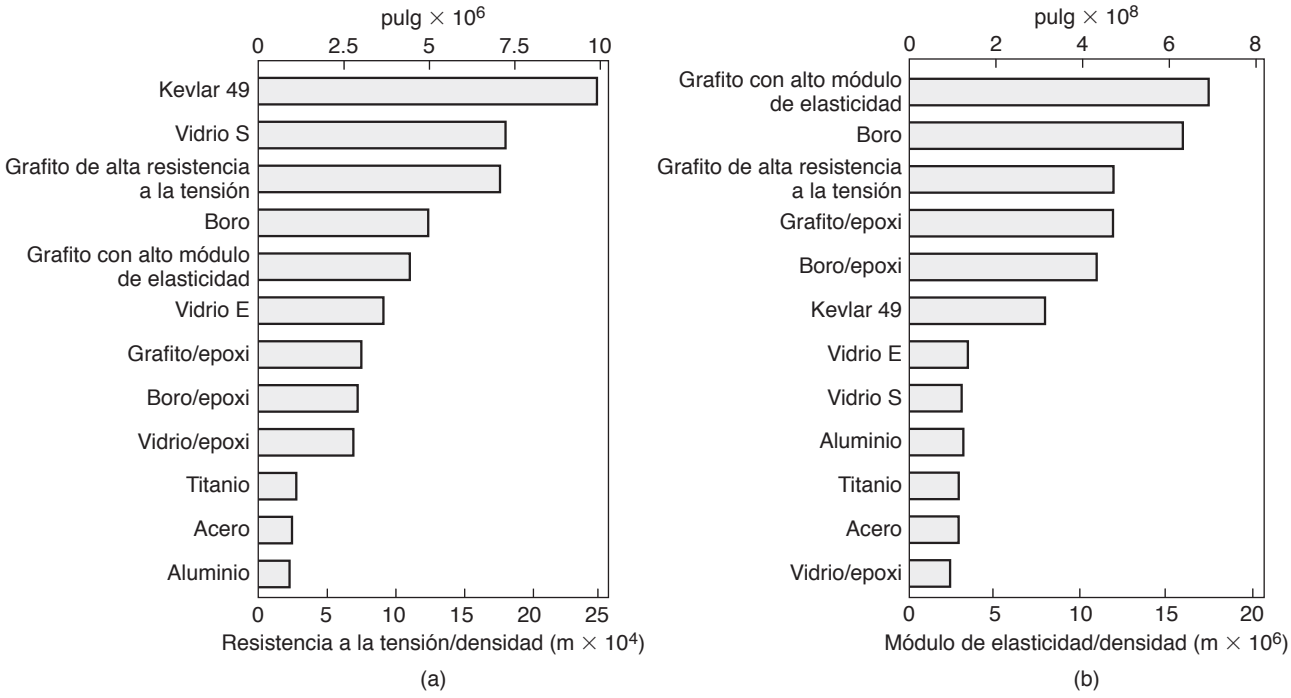


FIGURA 3.2 Resistencia específica (resistencia a la tensión/densidad) y rigidez específica (módulo de elasticidad/densidad) para diversos materiales a temperatura ambiente. (Vea también el capítulo 9).

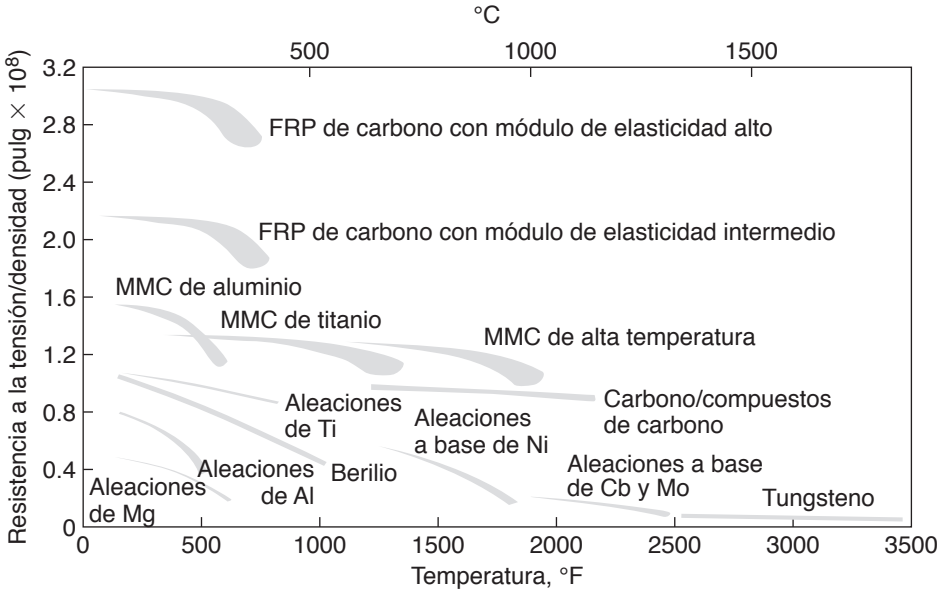


FIGURA 3.3 Resistencia específica (resistencia a la tensión/densidad) para una variedad de materiales en función de la temperatura; observe el rango de temperatura útil para estos materiales y los valores altos para los materiales compósitos. MMC = compósito de matriz metálica; FRP = plástico reforzado 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 ciclado 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 °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 ($HgBa_2Ca_2Cu_3O_x$) 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 inoxidables 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, poseía 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 *apariencia* 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 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.

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.

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
Agrietamiento por corrosión por esfuerzo
Calor específico
Conductividad eléctrica
Conductividad térmica
Conductores
Corrosión
Corrosión galvánica
Degradación
Densidad
Dieléctrico
Dilatación térmica
Efecto Invar
Efecto piezoeléctrico
Electroreostática
Esfuerzos térmicos
Fatiga térmica
Ferromagnetismo
Fluidos inteligentes
Lixiviación selectiva
Magnetoreostática
Magnetostricción
Materiales inteligentes
Oxidación
Pasivación
Punto de fusión
Resistencia específica
Resistividad eléctrica
Rigidez específica
Semiconductores
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 J/cm^3-K. Compare los resultados con el valor dado para el agua líquida (4.184 J/cm^3-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.

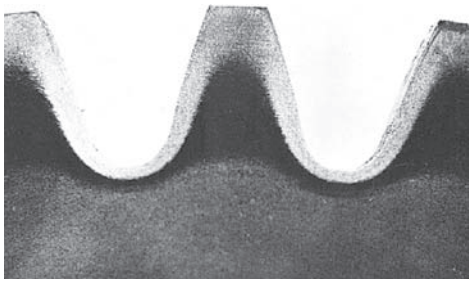


FIGURA 4.1 Sección transversal de los dientes de un engrane que muestra las superficies endurecidas por inducción. *Fuente:* TOCCO Div., Park-Ohio Industries, Inc.

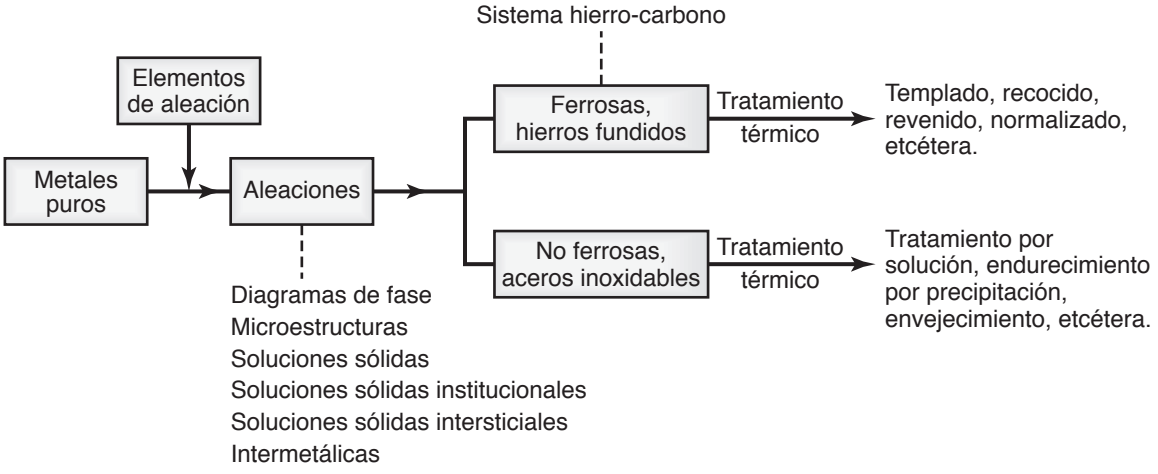


FIGURA 4.2 Resumen de los temas descritos en este capítulo.

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.

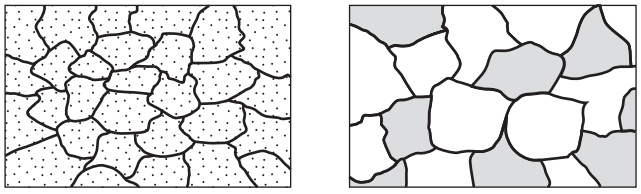


FIGURA 4.3 (a) Ilustración esquemática de granos, fronteras de grano y partículas dispersas por toda la estructura de un sistema bifásico, como en el caso de una aleación de plomo y cobre. Los granos representan al plomo en solución sólida en el cobre y las partículas son el plomo como una segunda fase. (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 *espojoso* 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).

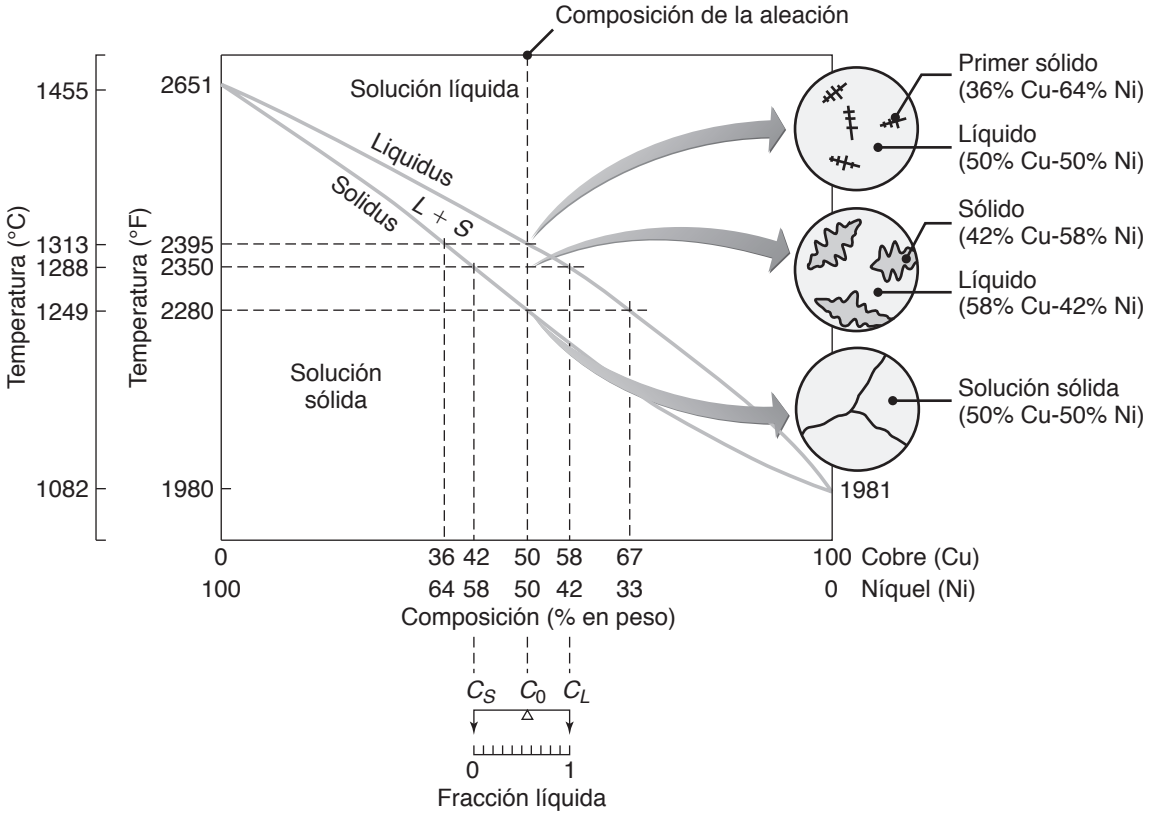


FIGURA 4.4 Diagrama de fase para el sistema de aleación de cobre y níquel obtenido a una velocidad lenta de solidificación. Observe que el níquel puro y el cobre puro tienen cada uno una temperatura de solidificación o de fusión. El círculo superior derecho muestra la nucleación de cristales. El segundo 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:

$$\frac{S}{S+L} = \frac{C_o - C_L}{C_S - C_L}. \tag{4.1}$$

De igual modo, la **fracción en peso de líquido** es proporcional a la distancia entre C_S y C_o, por lo tanto:

$$\frac{L}{S+L} = \frac{C_S - C_o}{C_S - C_L}. \tag{4.2}$$

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.

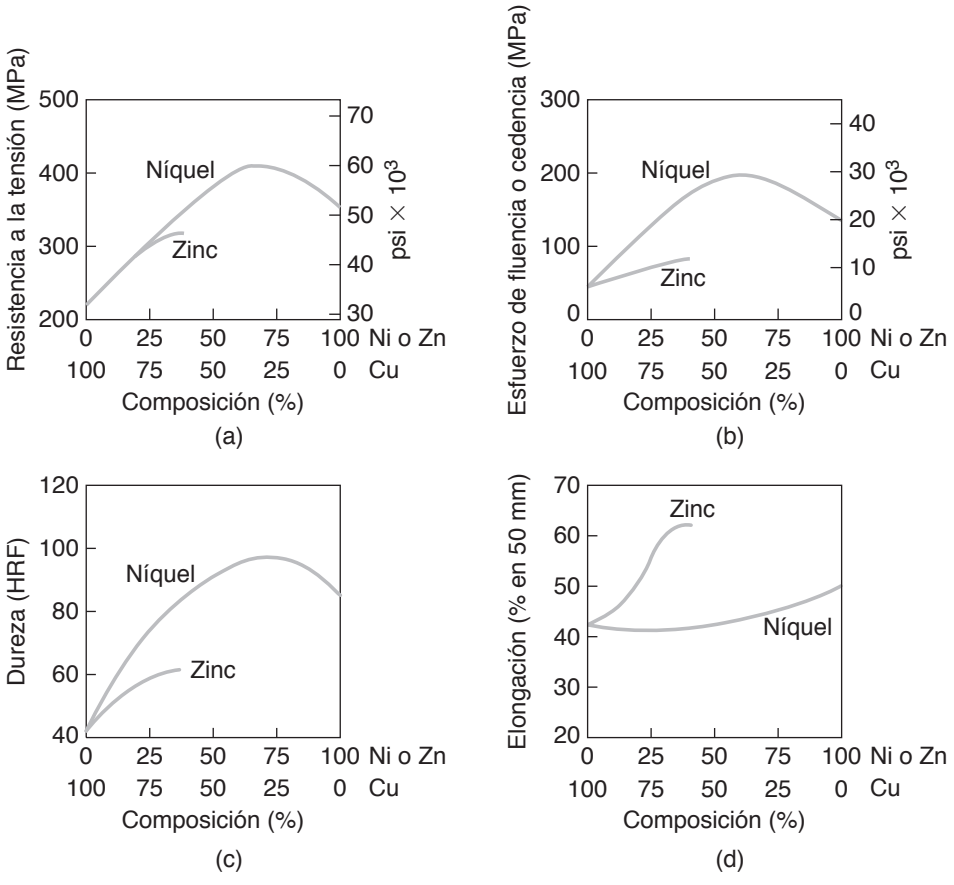


FIGURA 4.5 Propiedades mecánicas de las aleaciones cobre-níquel y cobre-zinc en función de su composición. Las curvas para el zinc son cortas, puesto que el zinc tiene un valor máximo de solubilidad sólida en el cobre del 40 por ciento.

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

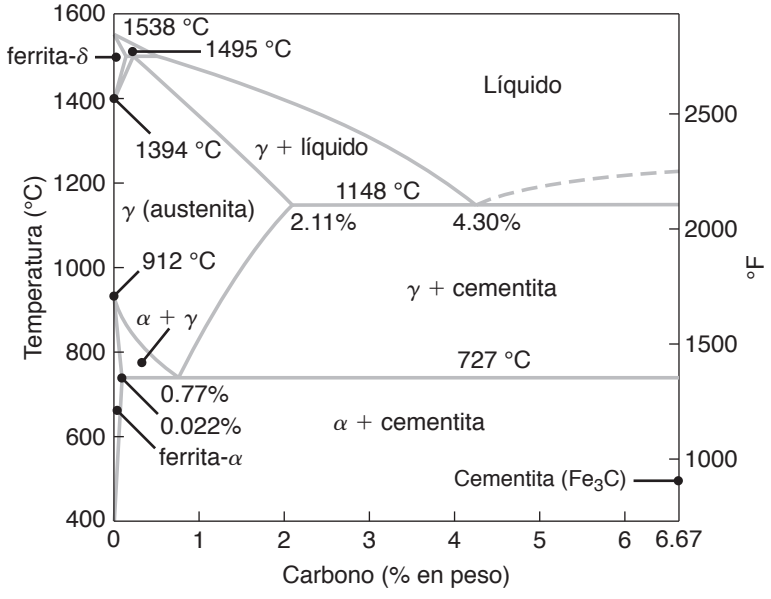
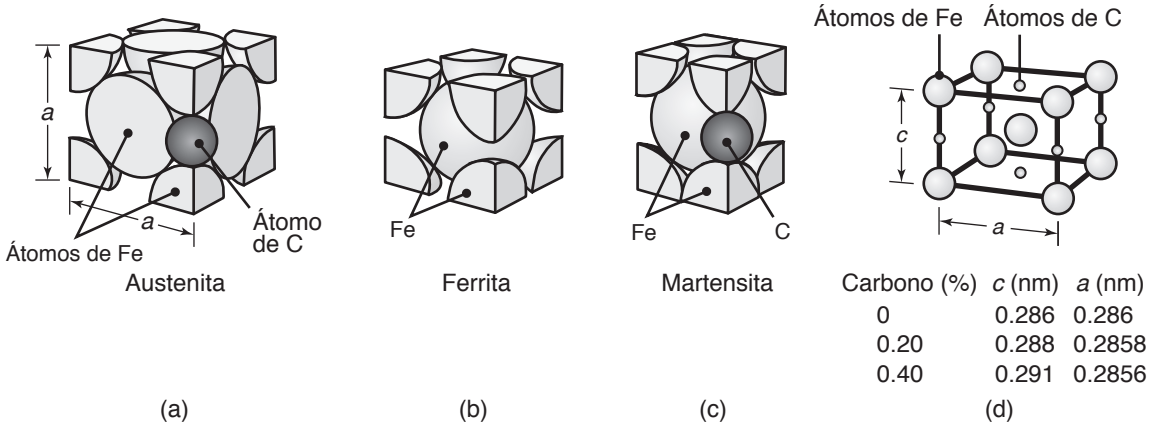


FIGURA 4.6 El diagrama de fase hierro-carburo de hierro.



Carbono (%)	*c* (nm)	*a* (nm)
0	0.286	0.286
0.20	0.288	0.2858
0.40	0.291	0.2856

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 inoxidables 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).

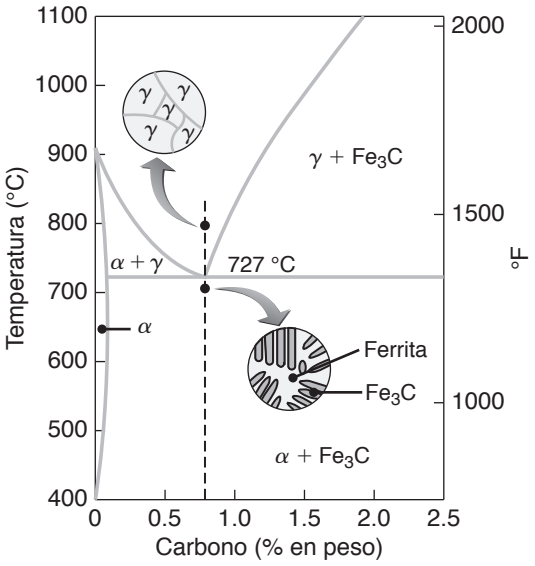


FIGURA 4.8 Ilustración esquemática de las microestructuras de una aleación de hierro-carbono de composición eutectoide (0.77% de carbono), por encima y por debajo de la temperatura eutectoide de 727 °C (1341 °F).

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**.

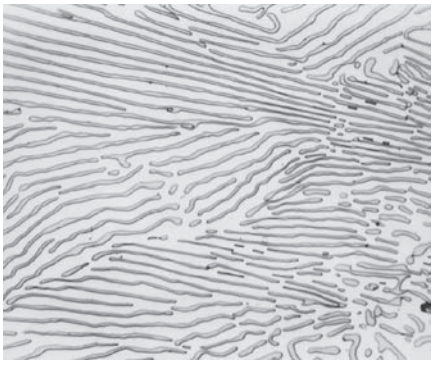


FIGURA 4.9 Microestructura de perlita en el acero 1080, formado a partir de austenita de composición eutectoide. En esta estructura laminar, las regiones más claras son de ferrita y las más oscuras son de carburo. Ampliación: 2500×.

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

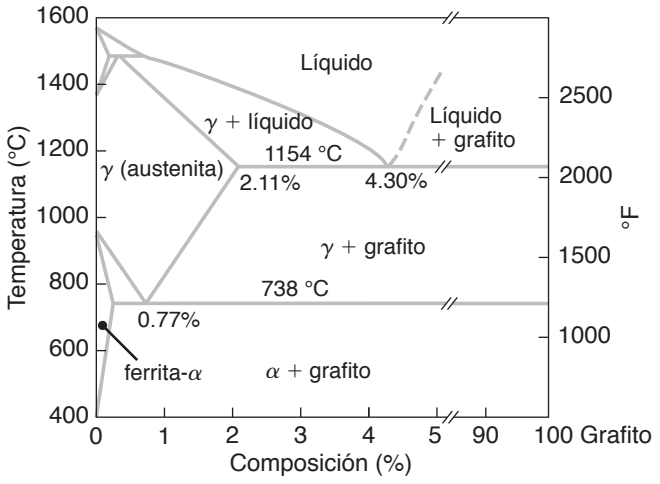


FIGURA 4.10 Diagrama de fase para el sistema hierro-carbono con grafito (en vez de cementita) como la fase estable; observe que esta figura es una versión extendida de la figura 4.6.

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.

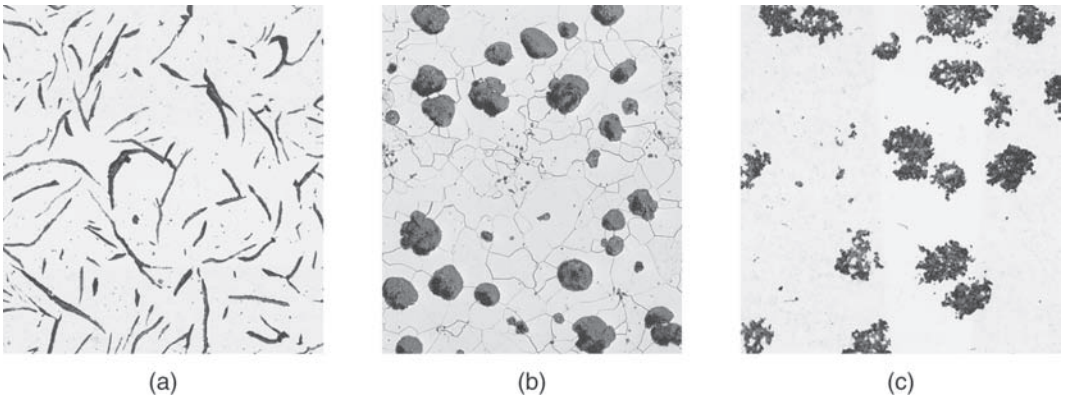


FIGURA 4.11 Microestructura para los hierros fundidos. Magnificación: 100×. (a) Hierro fundido gris ferrítico con hojuelas de grafito. (b) Hierro dúctil ferrítico (hierro nodular) con grafito en forma nodular. (c) Hierro maleable ferrítico; este hierro fundido se solidificó como hierro fundido blanco, 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 templado 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).

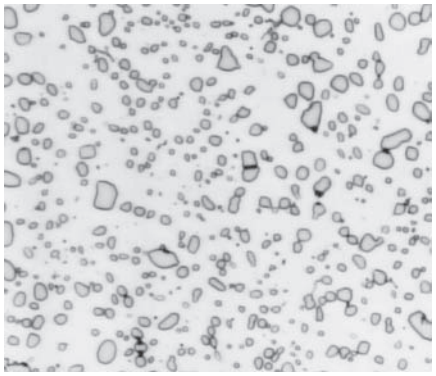


FIGURA 4.12 Microestructura del acero eutectoide. La esferoidita se forma al revenir el acero a 700 °C (1292 °F). Ampliación: 1000×.

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 templa 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.

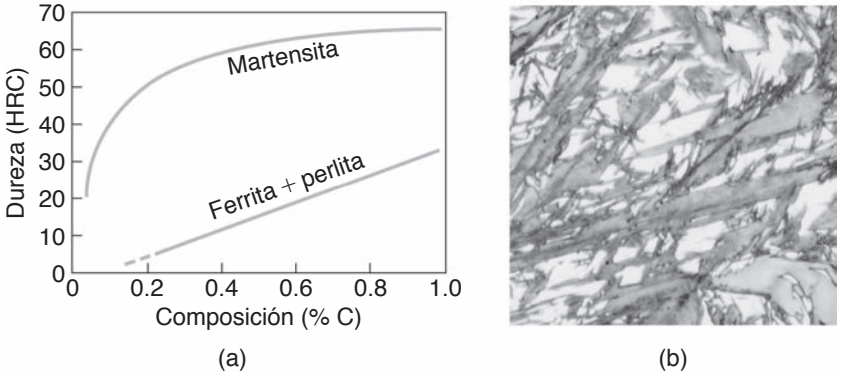


FIGURA 4.13 (a) Dureza de la martensita como una función del contenido de carbono. (b) Micrografía de una martensita que contiene 0.8% de carbono. Las regiones grises en forma de placa son martensita; tienen la misma composición que la austenita original (regiones blancas). Ampliación: 1000×.

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.

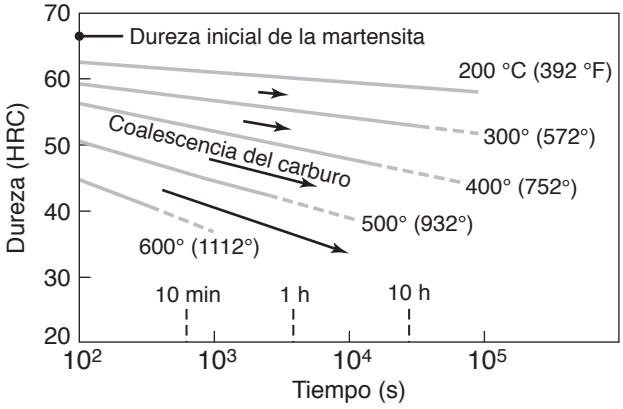


FIGURA 4.14 Dureza de la martensita revenida como una función del tiempo de revenido para el acero templado 1080 hasta 65 HRC. La dureza disminuye porque las partículas de carburo se unen y crecen en tamaño, aumentando de este modo la distancia entre partículas de la ferrita más blanda.

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.

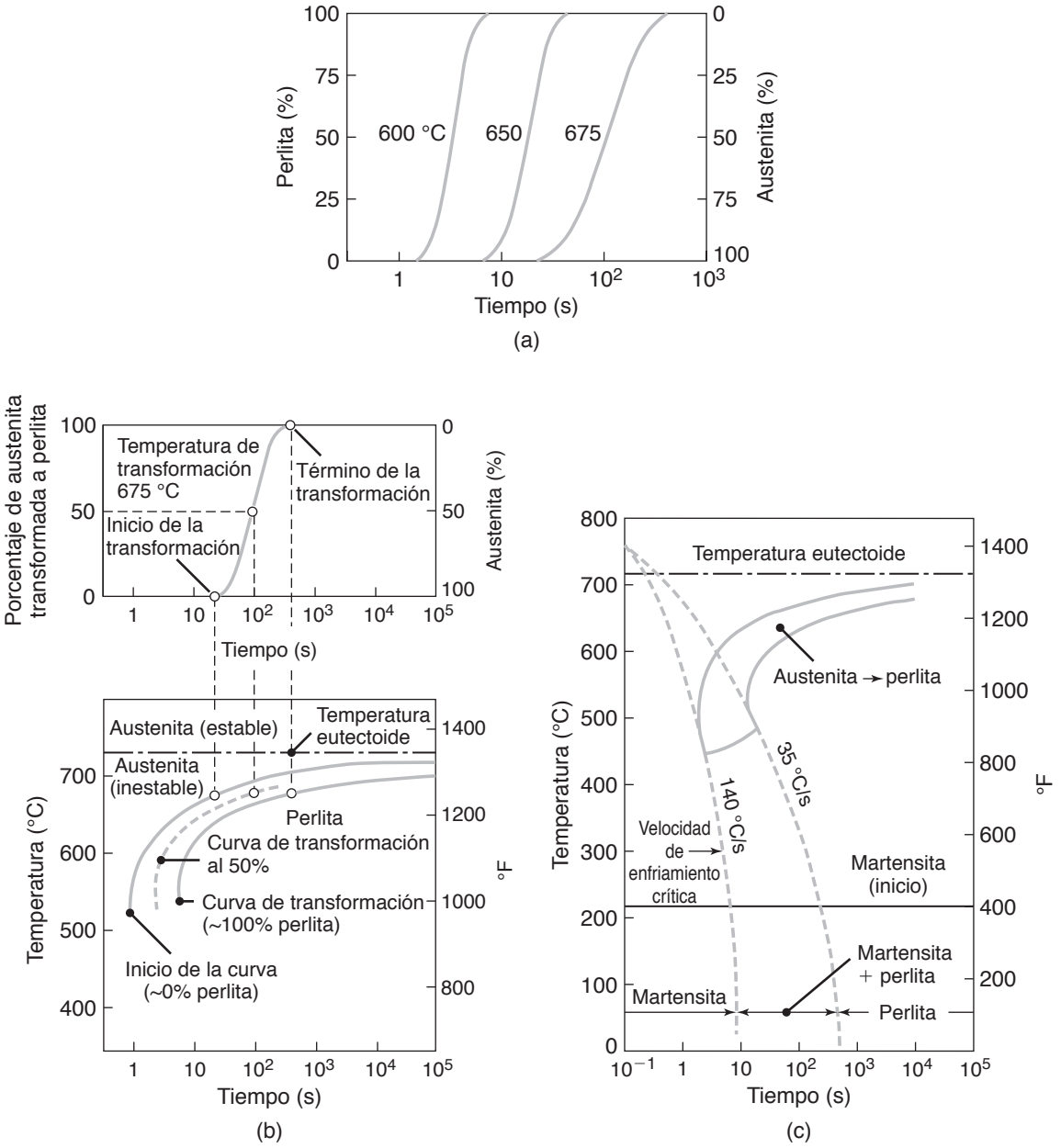


FIGURA 4.15 (a) Transformación de austenita a perlita de la aleación de hierro-carbono como una función del tiempo y la temperatura. (b) Diagrama de transformación isotérmica obtenida a partir de (a) para una temperatura de transformación de 675 °C (1247 °F). (c) Microestructuras obtenidas para una aleación de hierro-carbono eutectoide 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 templa 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.

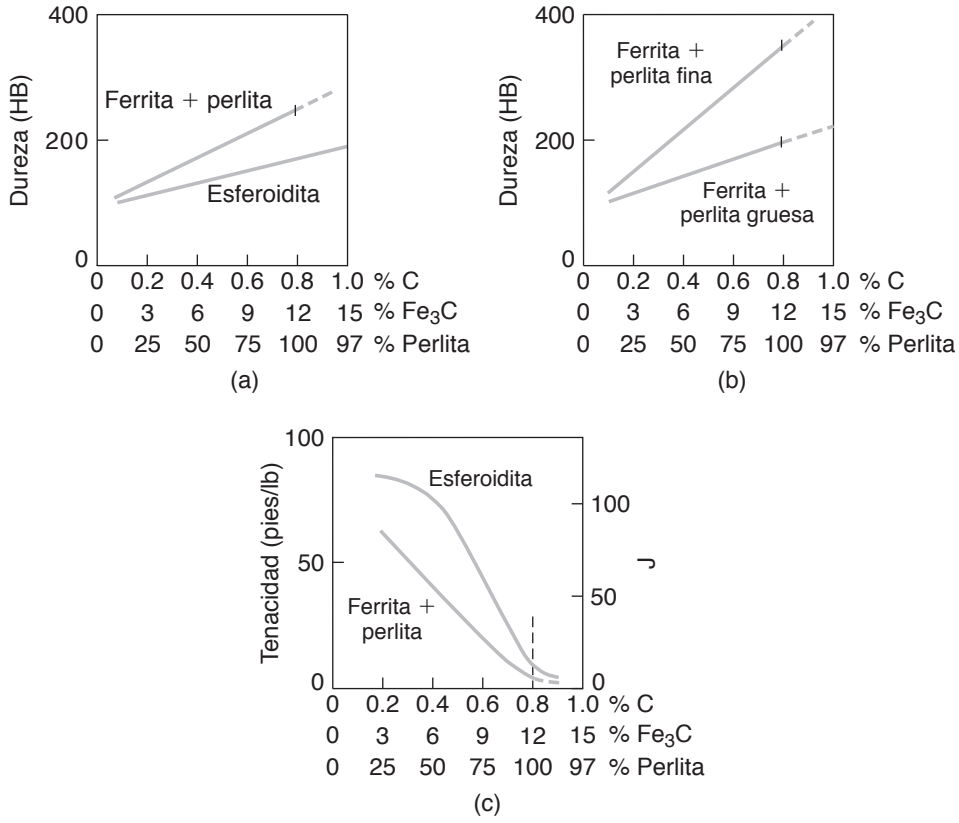


FIGURA 4.16 (a) y (b) Dureza y (c) tenacidad de los aceros al carbono recocidos como una función de la forma del carburo. En la perlita los carburos son laminares. La perlita fina se obtiene al aumentar la velocidad de enfriamiento. La estructura de la esferoidita tiene partículas de carburo del tipo esférico.

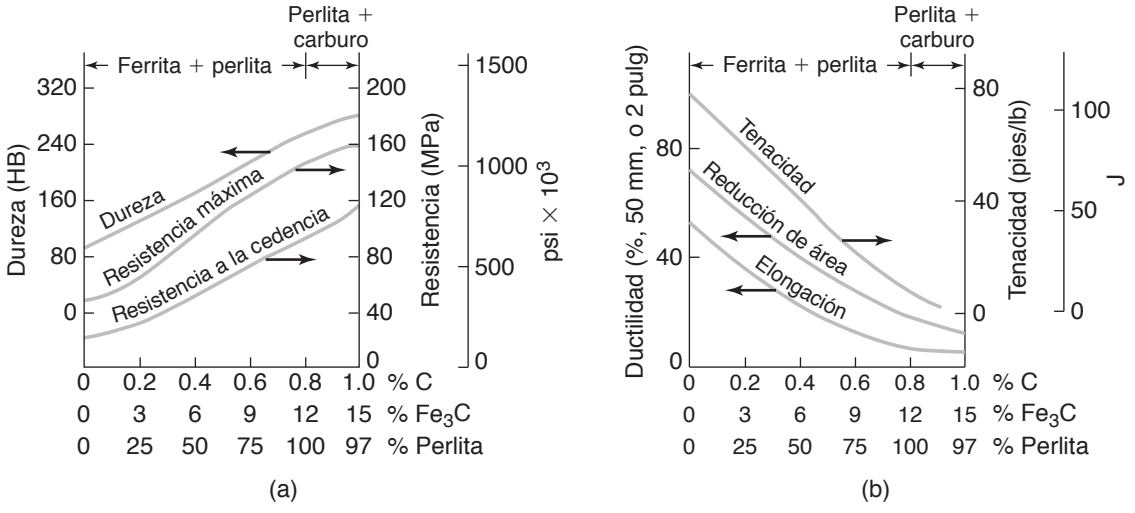


FIGURA 4.17 Propiedades mecánicas de los aceros recocidos como una función de la composición y la microestructura. Observe en (a) el incremento de la dureza y la resistencia y en (b) la disminución de la ductilidad y la tenacidad, con el aumento en las cantidades de perlita y carburo de hierro.

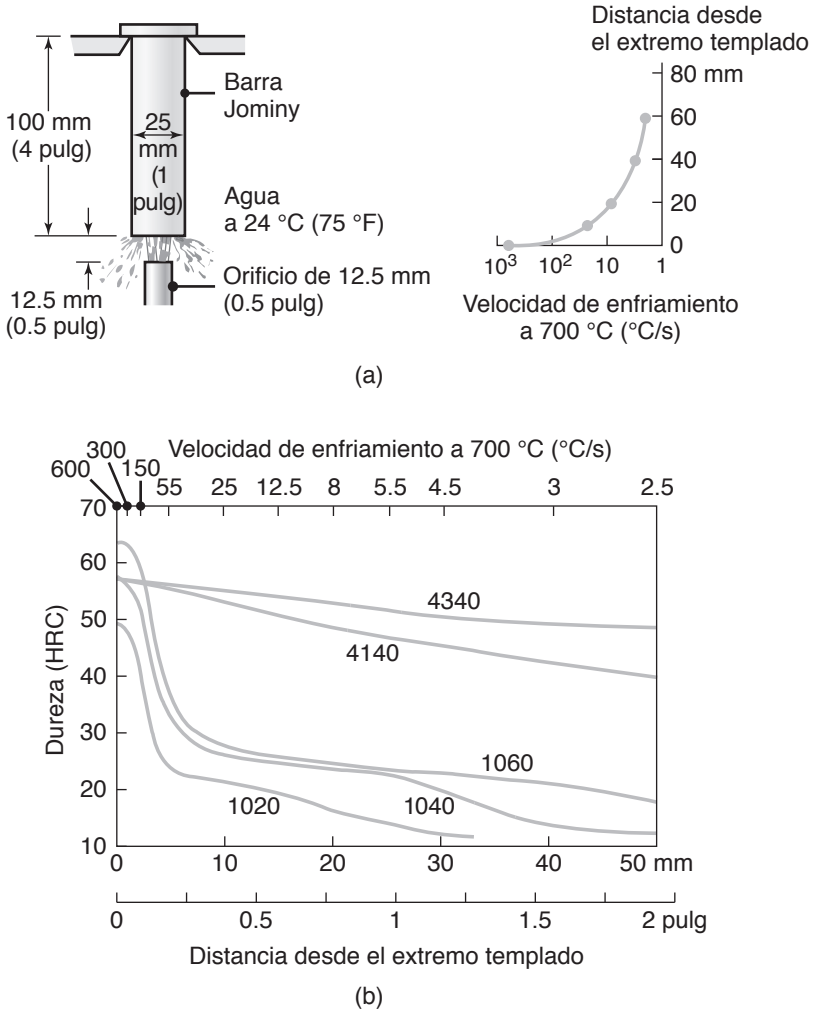


FIGURA 4.18 (a) Prueba de templado diferencial y velocidad de enfriamiento. (b) Curvas de templabilidad para cinco aceros diferentes, según se obtuvieron en la prueba de templado diferencial. Pequeñas variaciones en la composición pueden cambiar la forma de estas curvas. Cada curva es en realidad una 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 $CuAl_2$. Esta aleación puede tratarse térmicamente y sus propiedades se modifican mediante dos métodos diferentes: *tratamiento por solubilización* y *endurecimiento por precipitación*.

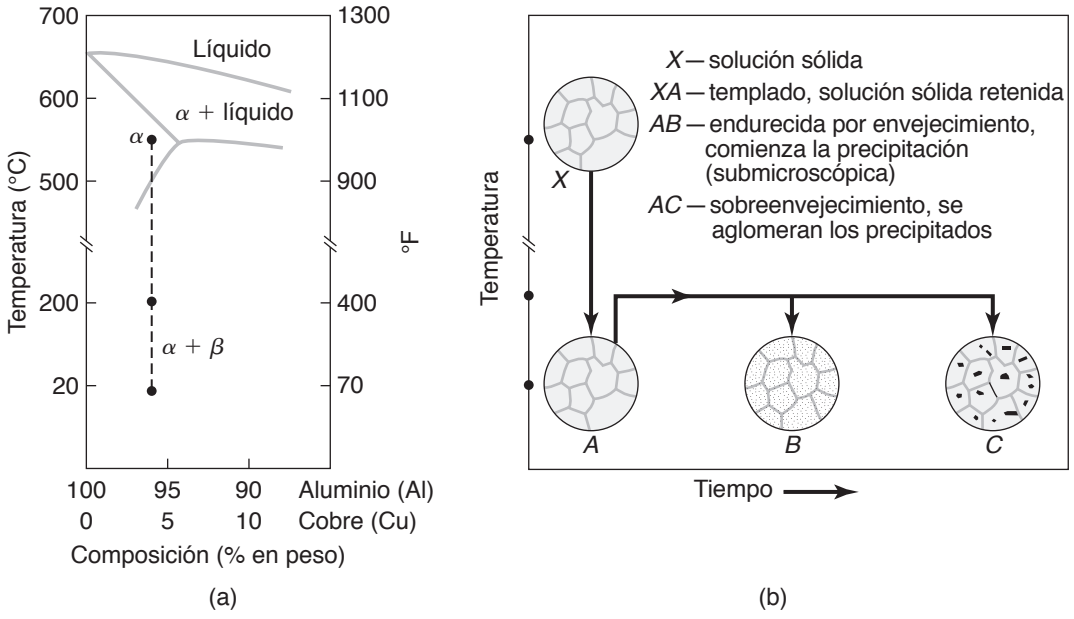


FIGURA 4.19 (a) Diagrama de fase para el sistema de aleación de aluminio-cobre. (b) Se obtienen diversas microestructuras durante el proceso de endurecimiento por envejecimiento.

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 recalentada 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.

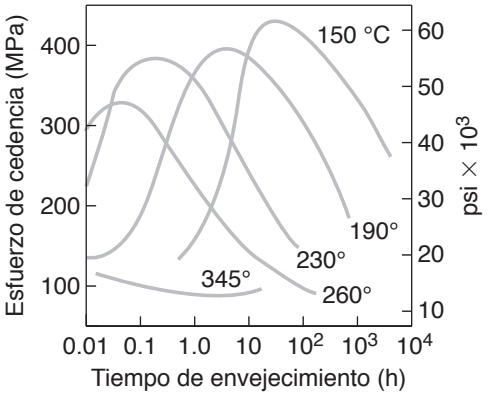


FIGURA 4.20 Efecto del tiempo de envejecimiento y de la temperatura sobre el esfuerzo de cedencia (o fluencia) de la aleación de aluminio 2014-T4; observe que, para cada temperatura, hay un tiempo de envejecimiento óptimo con el fin de obtener la resistencia máxima.

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).

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 un *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.	Engranes, 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 amoniaco; 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 inoxidables, aceros para herramientas de alta velocidad	N	Calentar el acero a 500-600 °C (925-1100 °F) en una atmósfera de gas amoniaco 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.	Engranes, 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 templa 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.	Engranes 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 templa.	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

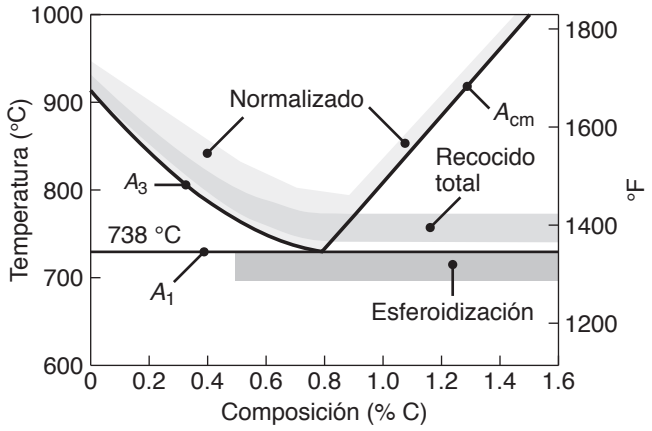


FIGURA 4.21 Rangos de temperatura del tratamiento térmico para los aceros al carbono, según lo indica el diagrama de fase de hierro-carburo de hierro.

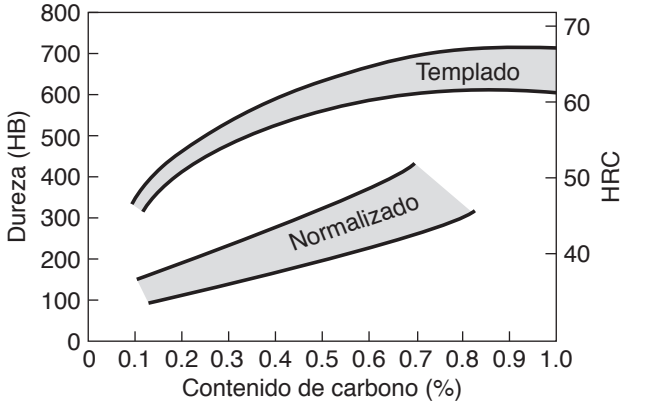


FIGURA 4.22 Dureza de los aceros en las condiciones de templado y normalizado como una función del contenido de carbono.

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 reviene 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.

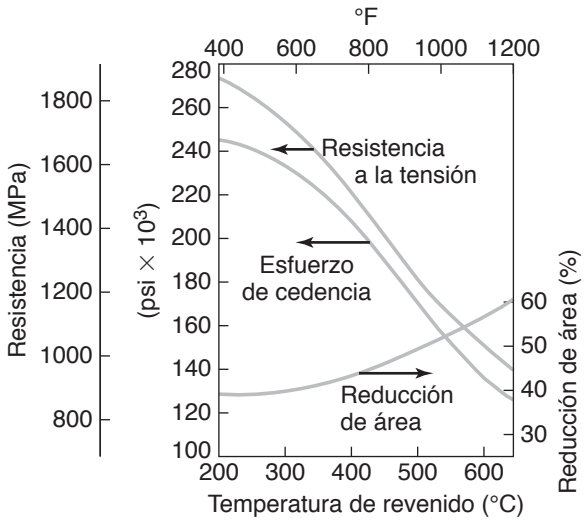


FIGURA 4.23 Propiedades mecánicas del acero 4340 templado en aceite como una función de la temperatura de revenido.

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.

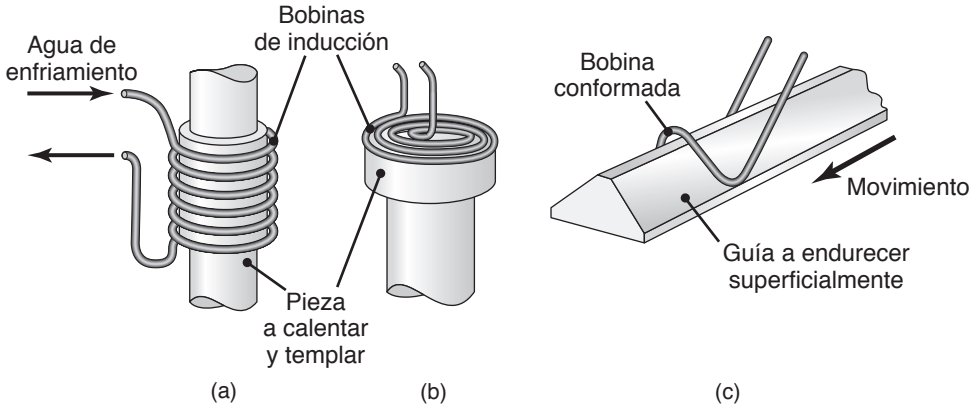


FIGURA 4.24 Tipos de bobinas utilizadas en el calentamiento por inducción de diferentes superficies de piezas.

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 templarla 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 inoxidables 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
Austenita
Austenita retenida
Bainita
Bainitizado
Cementita
Compuestos intermetálicos
Descarburización
Diagrama de equilibrio
Diagrama de fase binario
Diagramas de tiempo-temperatura-transformación
Distorsión
Endurecimiento por envejecimiento
Endurecimiento por precipitación
Endurecimiento superficial
Ensayo de extremo templado
Ensayo o prueba Jominy
Envejecimiento
Esferoidita o esferoidizado
Ferrita
Hierro fundido
Hornos
Maraging
Martensita
Martensita revenida
Metales puros
Normalizado
Perlita
Punto eutéctico
Reacción eutectoide
Recocido
Relevado de esfuerzos
Revenido
Sistema de hierro y carbono
Sistemas de dos fases o bifásicos
Sobreenvejecimiento
Solución sólida
Soluto
Solvente
Templabilidad
Temperatura Curie
Templado interrumpido
Transformaciones de fase
Tratamiento por solución
Tratamiento térmico

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 incurren 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.

CAPÍTULO 5

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.

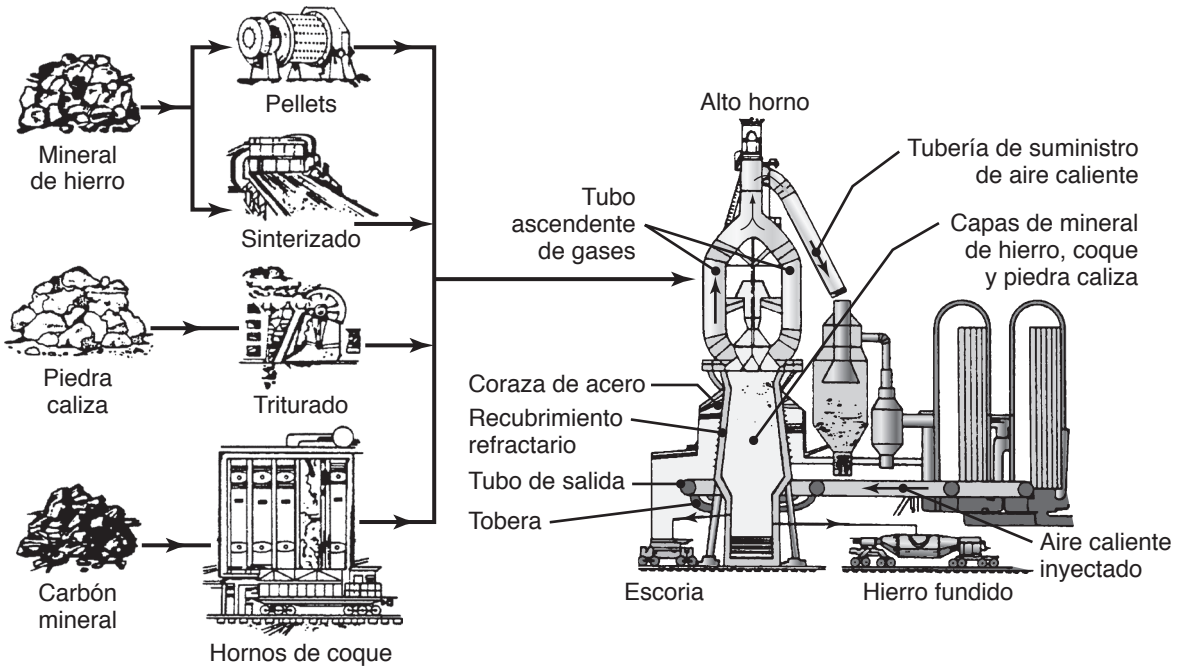


FIGURA 5.1 Ilustración esquemática de un alto horno.

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 torpedo 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

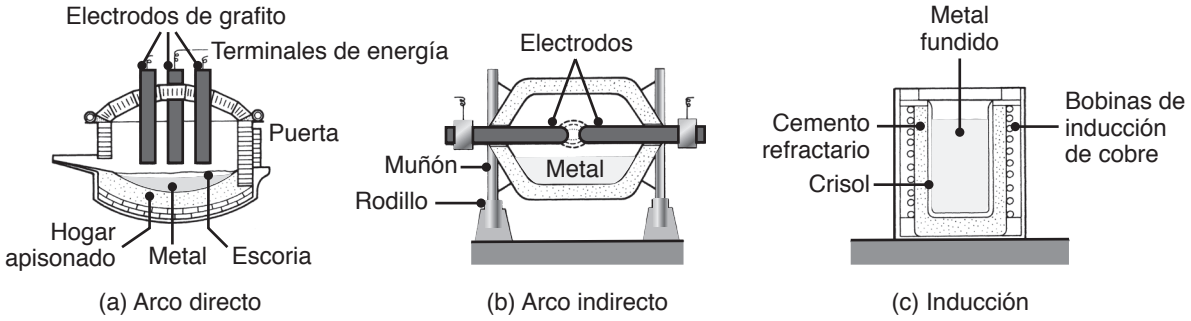


FIGURA 5.2 Ilustración esquemática de los tipos de hornos eléctricos.

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

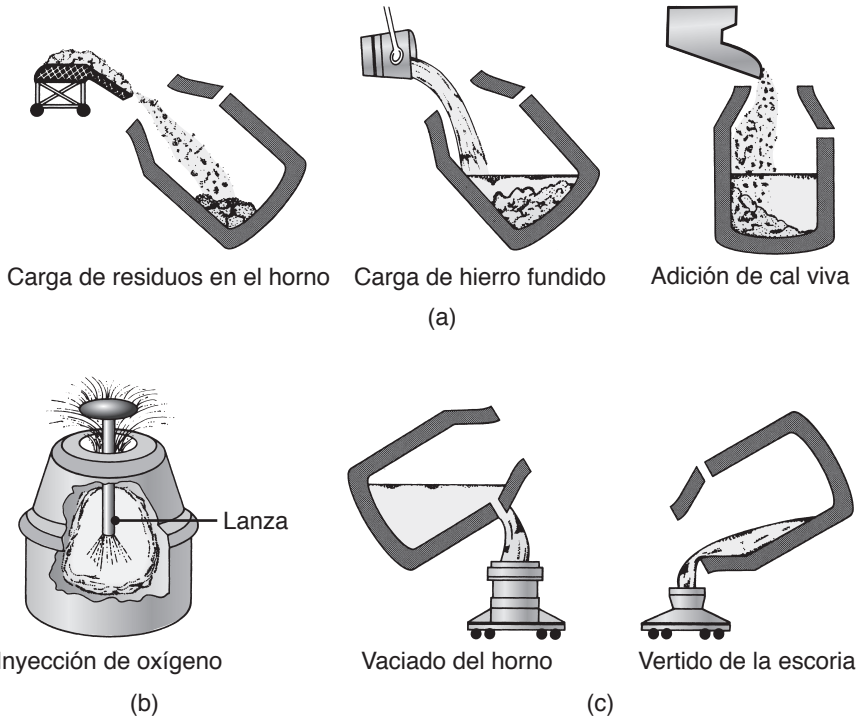


FIGURA 5.3 Ilustraciones esquemáticas que muestran la carga, la fusión y el vertido de hierro fundido en un proceso básico al oxígeno.

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-

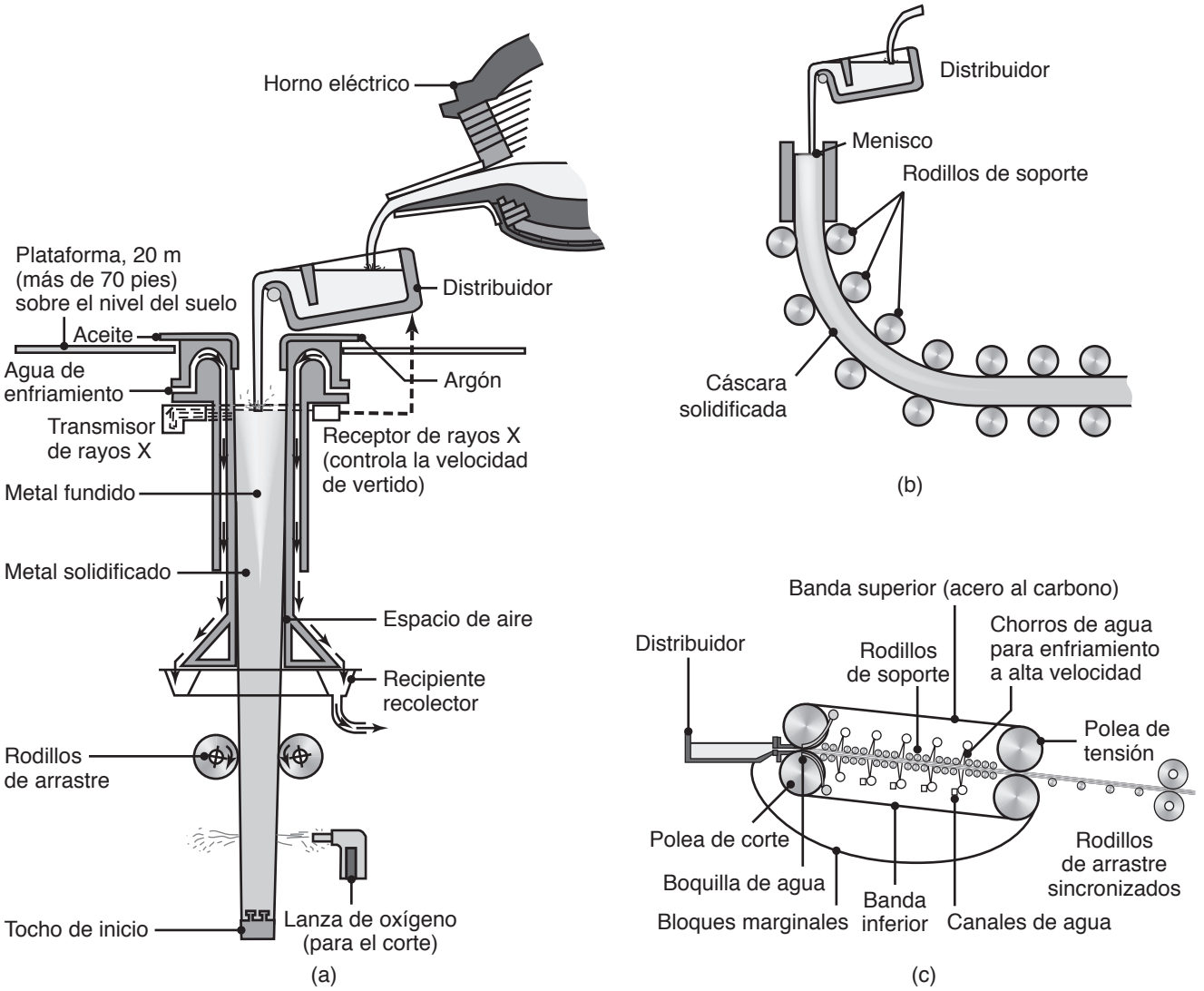


FIGURA 5.4 (a) Proceso de función continua del acero. Por lo general, el metal solidificado desciende a una velocidad de 25 mm/s (1 pulg/s); observe que la plataforma está aproximadamente a 20 m (65 pies) sobre el nivel del suelo. Fuente: Figura adaptada a partir de *Metalcaster's Reference and Guide* (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 templabilidad, 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
Engranes diferenciales	4023
Engranes (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 inoxidables 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

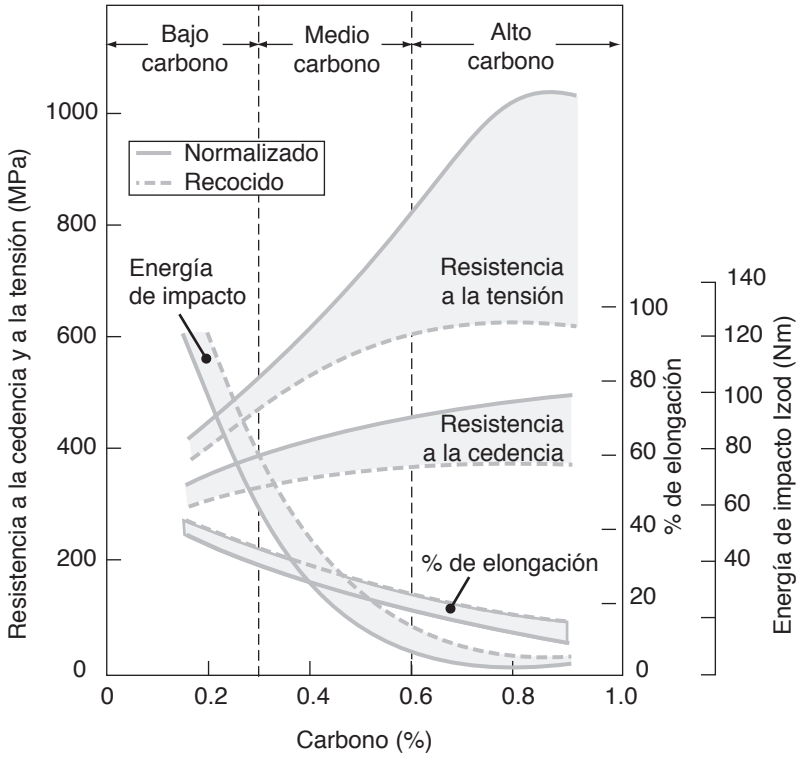


FIGURA 5.5 Efecto del contenido de carbono sobre las propiedades mecánicas del acero al carbono.

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 **resulfurados** (serie 11xx) y aceros al carbono **refosforados y resulfurados** (serie 12xx). Por ejemplo, el acero 1112 es un acero resulfurado 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, n
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

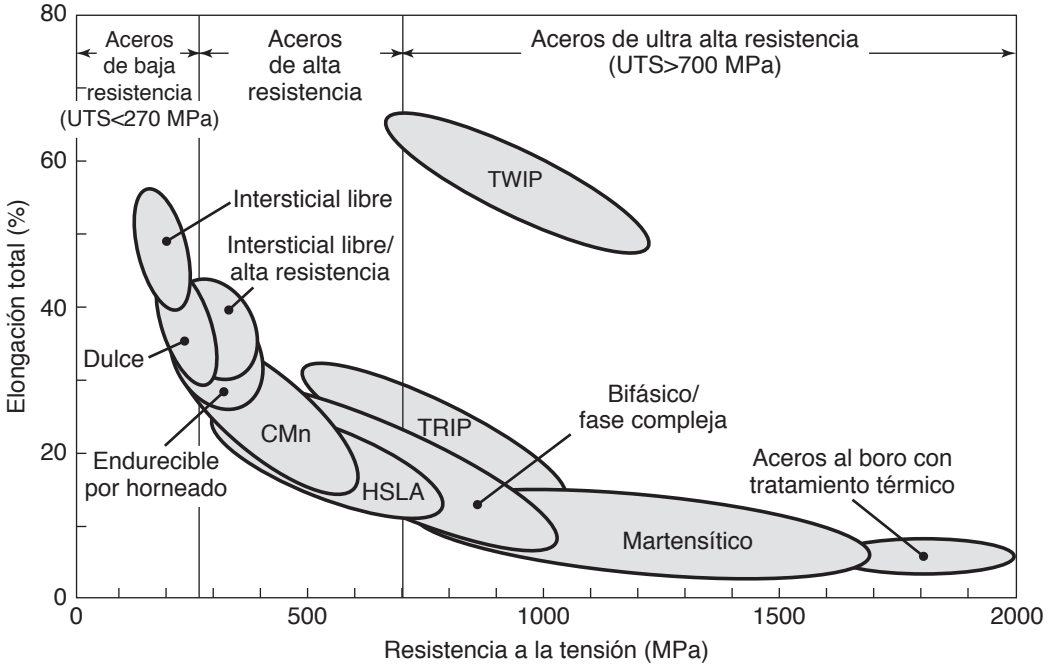


FIGURA 5.6 Comparación de aceros avanzados de alta resistencia.

TABLA 5.5

Designaciones AISI para las hojas de acero de alta resistencia

Resistencia a la cedencia			
ksi	**MPa**	**Composición química**	**Práctica de desoxidación**
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 carbonitruro 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.

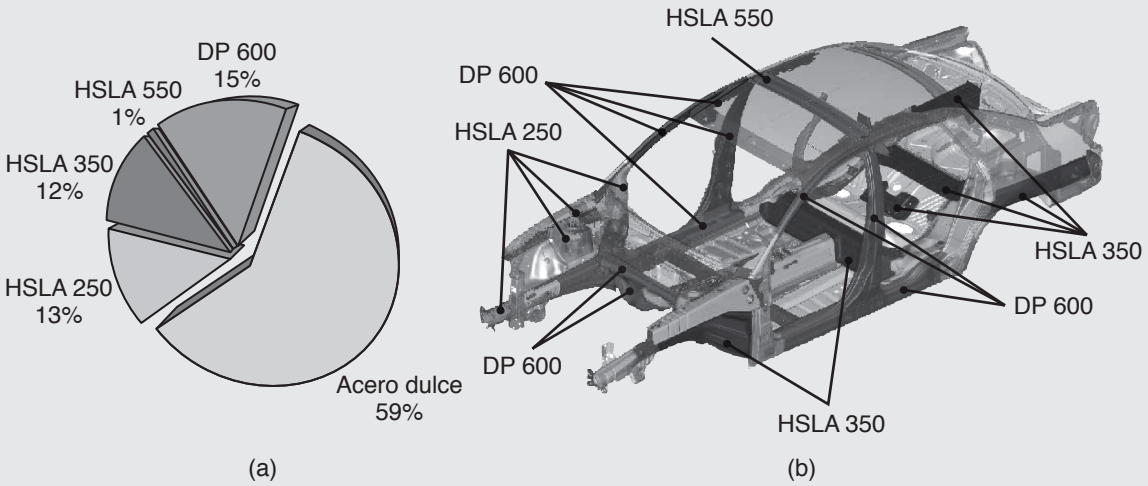


FIGURA 5.7 Aplicaciones del acero avanzado de alta resistencia en el automóvil Ford 500. (a) Uso de aceros avanzados de alta resistencia por su porcentaje en peso; (b) aleaciones y componentes estructurales utilizados. *Fuente:* Cortesía del American Iron and Steel Institute.

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.

rrosión 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 inoxidables 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
Acero calmado
Acero efervescente
Acero inoxidable martensítico
Acero semicalmado
Aceros al carbono
Aceros aleados
Aceros bifásicos
Aceros de alta resistencia y baja aleación
Aceros de fase compleja
Aceros inoxidables
Aceros microaleados
Aceros nanoaleados
Aceros para herramientas y dados
Aceros TRIP
Aceros TWIP
Alto horno
Elementos en trazas
Fundición continua
Fundición en líneas
Hierro cochino (arrabio)
Horno básico al oxígeno
Horno de hogar abierto
Horno eléctrico
Lingote
Refinamiento

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.

CAPÍTULO 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 Superaleaciones 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 compósito 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.
Superaleaciones	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.

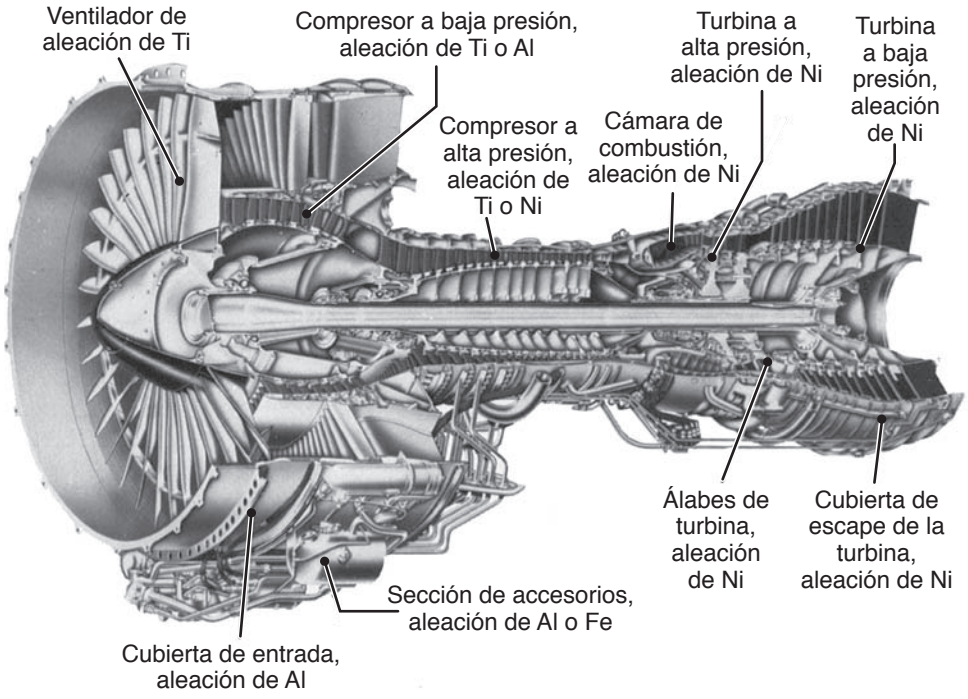


FIGURA 6.1 Sección transversal de un motor a reacción (PW2037) que muestra varios componentes y las aleaciones utilizadas en su manufactura. *Fuente:* Cortesía de United Aircraft Pratt & Whitney.

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

	Características*			
Aleación	Resistencia a la corrosión	Maquinabilidad	Soldabilidad	Aplicaciones típicas
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 bronces. 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 bronces como el bronce al aluminio (una aleación de cobre y aluminio) y los bronces 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, carcazas 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 bronces 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, escaparates, 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 electrolíticamente 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 inoxidables 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 Superaleaciones

Las *superaleaciones* 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 superaleaciones 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 superaleaciones se encuentran en los motores a reacción y las turbinas a gas; otras aplicaciones son en motores reciprocantes, motores de cohetes, herramientas y dados para el trabajo en caliente con metales y en las industrias nuclear, química y petroquímica.

Usualmente, las superaleaciones se identifican mediante nombres comerciales o por sistemas especiales de numeración y están disponibles en toda una variedad de formas. La mayoría de las superaleaciones 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 superaleaciones *a base de hierro*, *a base de cobalto* o *a base de níquel*.

- Por lo general, las **superaleaciones 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 **superaleaciones 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 superaleaciones a base de níquel, pero conservan su resistencia a temperaturas más altas.
- Las **superaleaciones 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 superaleaciones (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 aluminuro de titanio** (TiAl y Ti_3Al, 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 panal, 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 compósito 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.

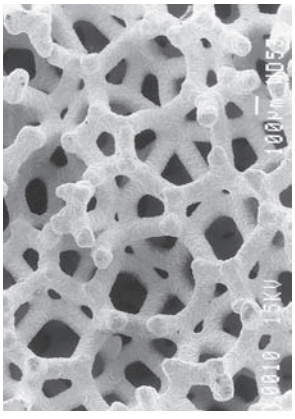


FIGURA 6.3 Estructura de una espuma metálica que se usa en implantes ortopédicos para fomentar el crecimiento del hueso. *Fuente:* Cortesía de Zimmer, Inc.

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
Aleaciones con memoria de forma
Aleaciones de bajo punto de fusión
Babbitts
Bronce
Espuma metálica
Fundiciones (*smelted*)
Galvanizado
Latón
Materiales inteligentes
Metales preciosos
Metales refractarios
No ferrosos
Peltre
Pirometalurgia
Superaleaciones
Vidrios metálicos

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.

Fremond, 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 Tempers**, 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:				
Acrilonitrilo-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

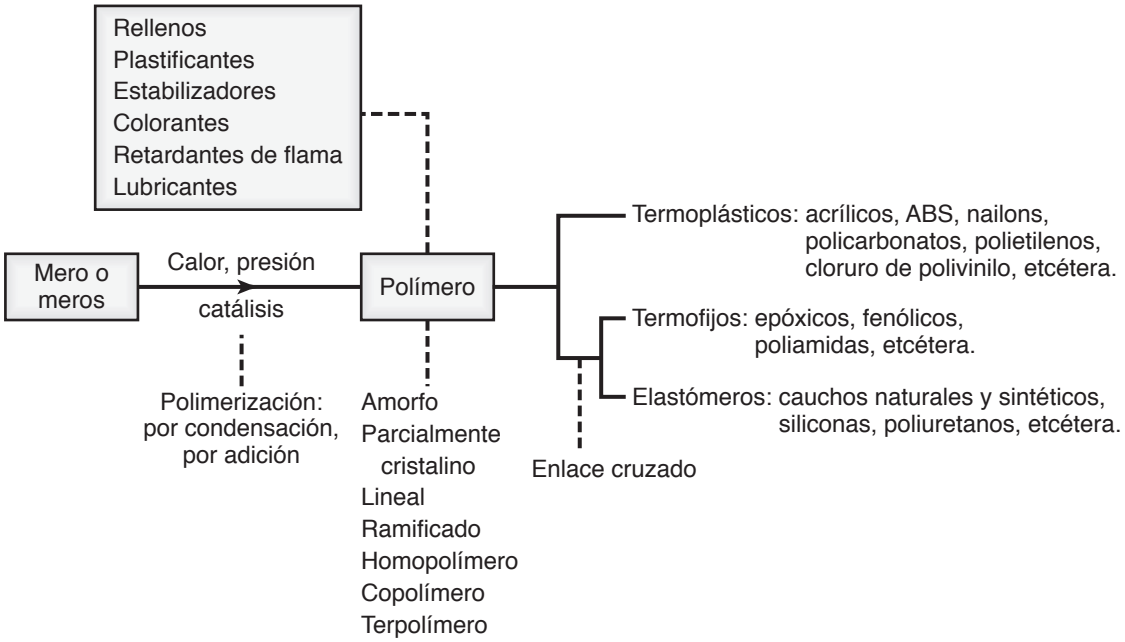


FIGURA 7.1 Esquema de los temas descritos en este capítulo.

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**.

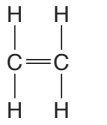
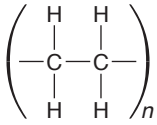
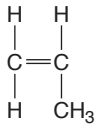
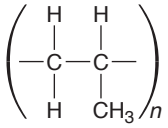
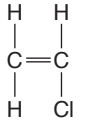
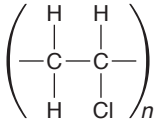
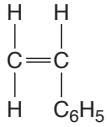
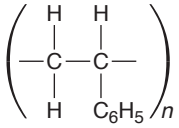
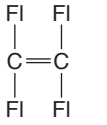
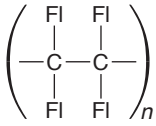
Monómero	Unidad de repetición del polímero	
		Polietileno (PE, o también con el acrónimo PETE)
		Polipropileno (PP)
		Cloruro de polivinilo (PVC)
		Poliestireno (PS)
		Politetrafluoroetileno (PTFE) (Teflón)

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 *polietileno*; 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-

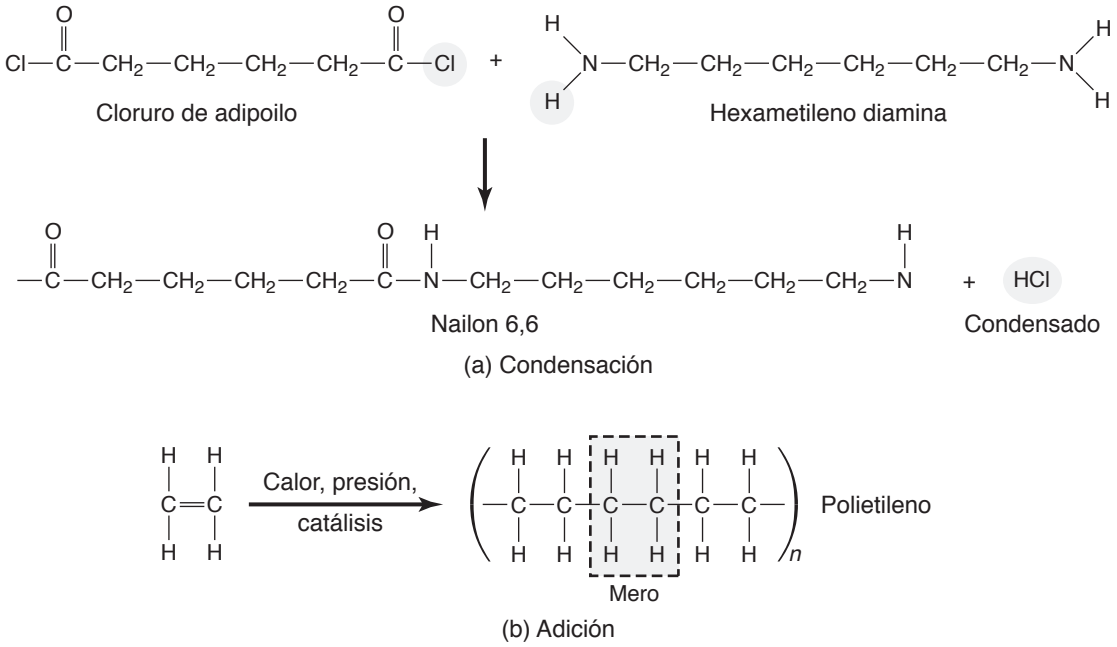


FIGURA 7.3 Ejemplos de polimerización. (a) Polimerización por condensación de nailon 6,6 y (b) polimerización por adición de moléculas de polietileno a partir de meros de etileno.

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.

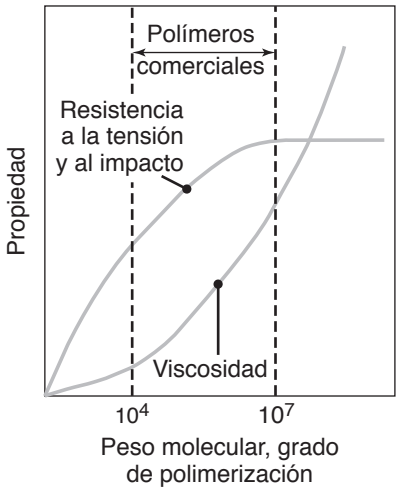


FIGURA 7.4 Efecto del peso molecular y del grado de polimerización sobre la resistencia y la viscosidad de los polímeros.

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-

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 (nailon 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

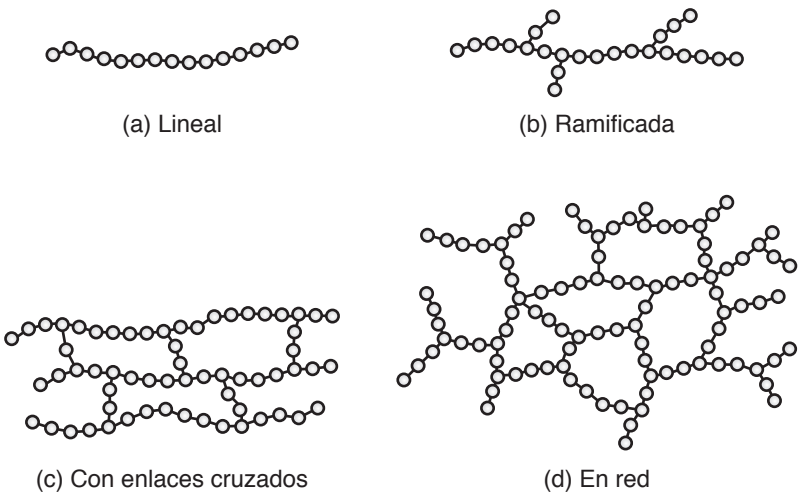


FIGURA 7.5 Ilustración esquemática de las cadenas poliméricas. (a) Estructura lineal —los termoplásticos como los acrílicos, el nailon, el polietileno y el cloruro de polivinilo tienen estructuras lineales. (b) Estructura ramificada, como en el polietileno. (c) Estructura con enlaces cruzados —muchos 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.

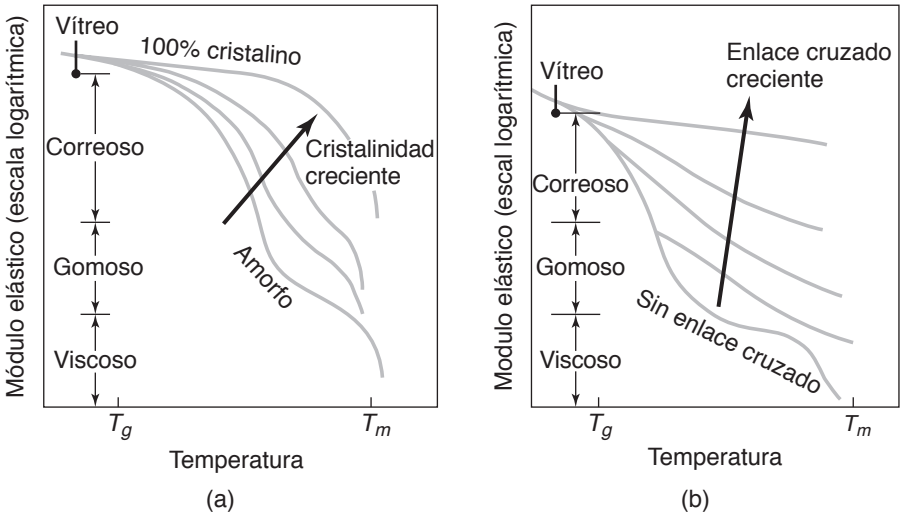


FIGURA 7.6 Comportamiento de los polímeros como una función de la temperatura y (a) el grado de cristalinidad y (b) el grado de enlaces cruzados. El comportamiento elástico y viscoso combinado de los polímeros se conoce como viscoelasticidad.

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 ptoluidino (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 compósito 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.

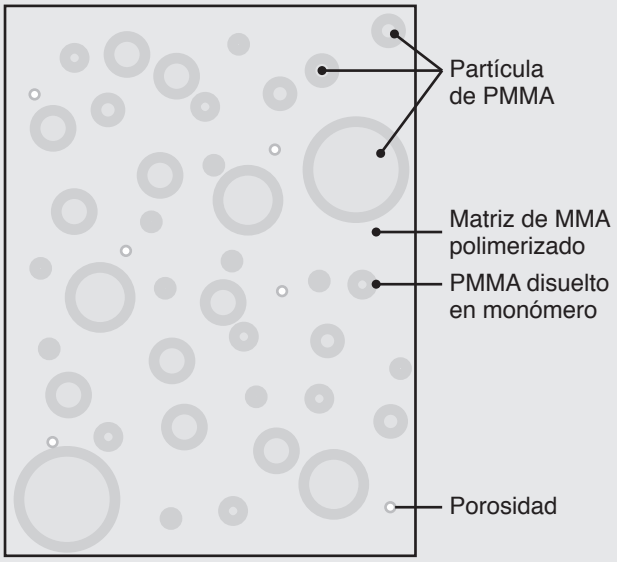


FIGURA 7.7 Ilustración esquemática de la microestructura del cemento de polimetilmetacrilato utilizado en aplicaciones dentales y médicas.

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 entretejidas 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.

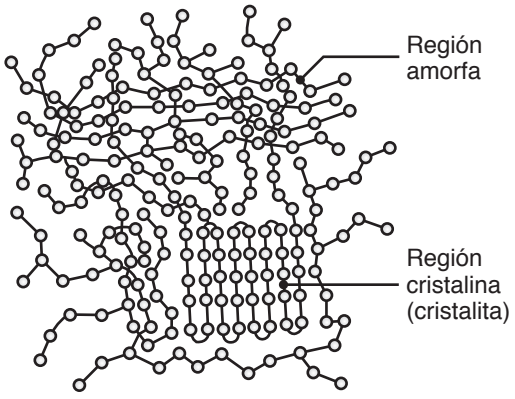


FIGURA 7.8 Regiones amorfa y cristalina en un polímero; la región cristalina (cristalita) tiene una disposición ordenada de las moléculas. Cuanto mayor sea la cristalinidad, más duro, más rígido y menos dúctil será el polímero.

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.

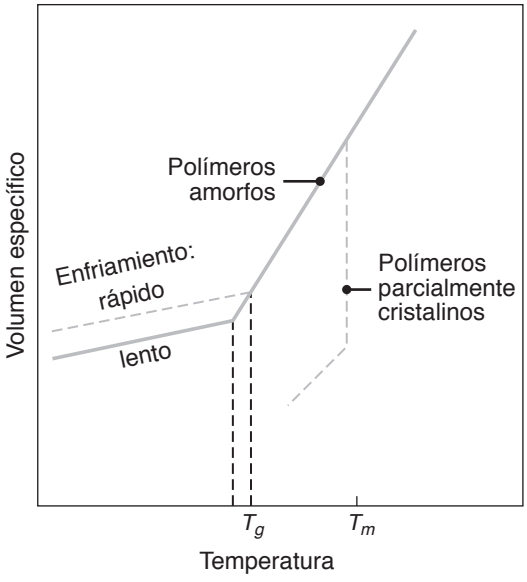


FIGURA 7.9 Volumen específico de los polímeros como una función de la temperatura. Los polímeros amorfos, como el acrílico y el policarbonato, tienen una temperatura de transición vítrea pero no un punto de fusión específico. Los polímeros parcialmente cristalinos, como el polietileno y el nailon, se contraen bruscamente al pasar por sus temperaturas de fusión durante el enfriamiento.

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

TABLA 7.2

Temperaturas de transición vítrea y fusión de algunos polímeros

Material	T_g (°C)	T_m (°C)
Nailon 6,6	57	265
Policarbonato	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).

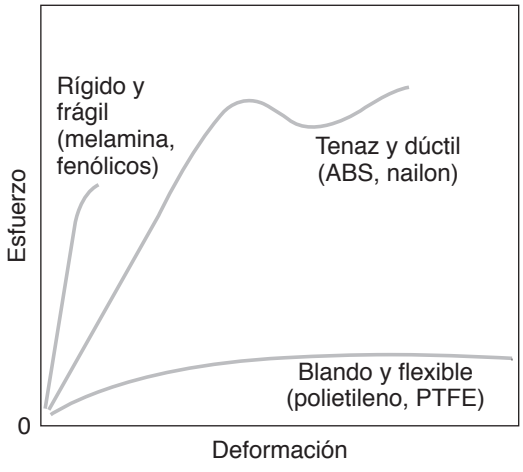


FIGURA 7.10 Terminología general que describe el comportamiento de tres tipos de plásticos. El nombre comercial del PTFE (politetrafluoroetileno) es Teflón. *Fuente:* Según R. L. E. Brown.

Efectos de la temperatura. Si la temperatura de un polímero termoplástico se eleva por encima de su T_g, primero se vuelve *correoso* 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.

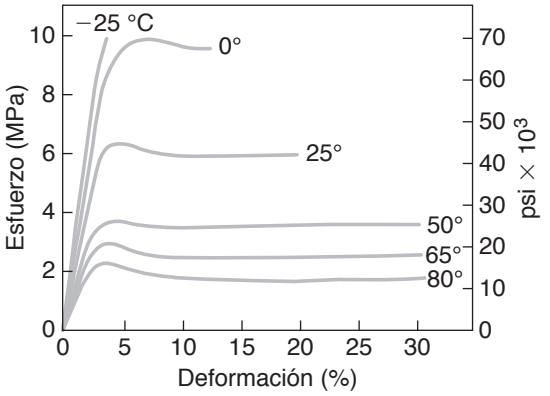


FIGURA 7.11 Efecto de la temperatura sobre la curva de esfuerzo-deformación para el acetato de celulosa, un termoplástico. Observe la gran disminución de la resistencia y el gran aumento de la ductilidad con un incremento relativamente pequeño en la temperatura. *Fuente:* Según T. S. Carswell y H. K. Nason.

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.

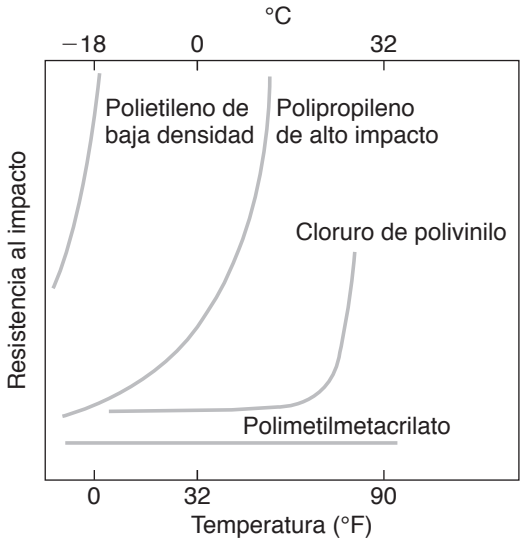


FIGURA 7.12 Efecto de la temperatura sobre la resistencia al impacto de varios plásticos. Los cambios pequeños en la temperatura pueden tener un efecto significativo sobre la resistencia al impacto. *Fuente:* Según P. C. Powell.

Cuarteaduras (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 *cuarteaduras*. Aunque pueden parecer grietas, las cuarteaduras 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 cuarteaduras 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 cuarteaduras, llamadas en estos casos **agrietamiento por esfuerzo ambiental** y **cuarteaduras por solvente**. Los esfuerzos residuales presentes en el material también contribuyen a las cuarteaduras 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 "cuarteadura" refleja solamente la parte final de este mecanismo de deterioro.

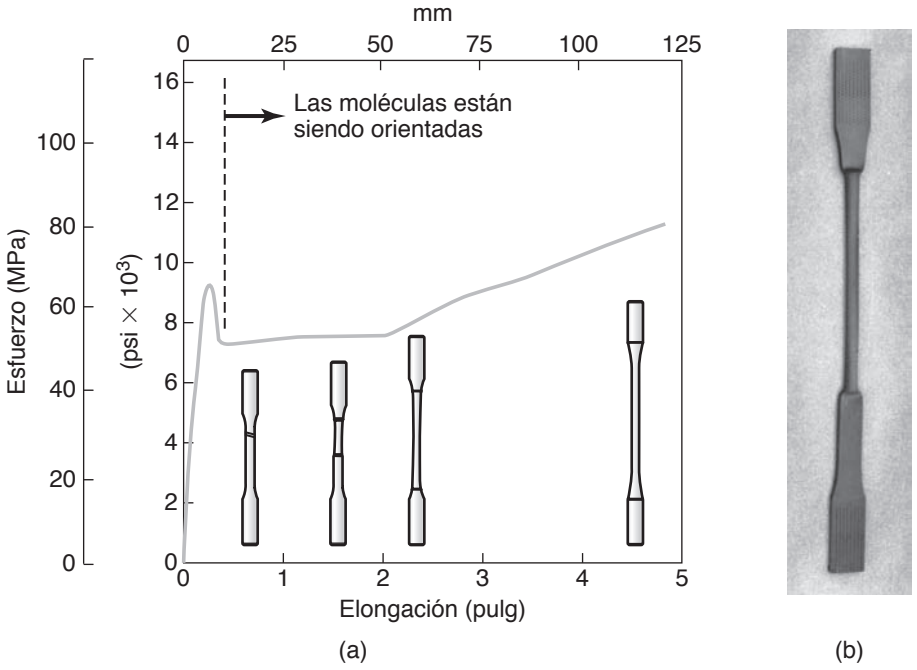


FIGURA 7.13 (a) Curva de esfuerzo-elongación para el policarbonato, un termoplástico. *Fuente:* Cortesía de R. P. Kambour y R. E. Robertson. (b) Muestra para pruebas a tensión, hecha de polietileno de alta densidad, que presenta elongación uniforme (la región larga y delgada en la muestra).

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 poliacetileno, 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_yC_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_yC_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, poliimidas.
Resistencia al desgaste	Engranes, bandas y revestimientos de desgaste, cojinetes, bujes, patines.	Acetales, nailon, compuestos fenólicos, poliimidas, 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, poliimidas.
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, poliimidas, 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, Acristeel, 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, Vydyne, Zytel.
Policarbonato: APEC, Calibre, Hyzod, Lexan, Makrolon, Merlon.
Poliéster: Dacron, Eastpac, Ektar, Kodel, Mylar, Rynite.
Polieterimida: Ultem.
Polietileno: 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: Foraflon, 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 autolubricantes 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 **poliimidas** 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 **poliimidas** 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 poliimidas 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 cardiacas 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 procesamiento 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)

Los *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.

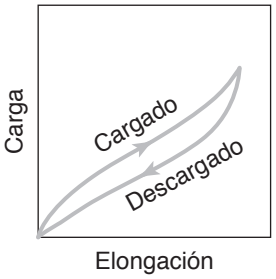


FIGURA 7.14 Curva típica de carga-elongación para los hules; el ciclo marcado en sentido horario, que indica las trayectorias de carga y descarga, muestra las pérdidas de histéresis. La histéresis proporciona a los hules la capacidad de disipar energía, amortiguar la vibración y absorber cargas de choque, tal como se requiere en los neumáticos de automóvil y en los amortiguadores de vibraciones que se colocan debajo de la maquinaria.

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;

(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
Biodegradable
Blanqueamiento por esfuerzo
Colorantes
Cristalinidad
Cuarteaduras
Curado
Degradación
Dopado
Elastómero
Enlaces
Enlaces primarios
Enlaces secundarios
Envejecimiento térmico
Grado de cristalinidad
Grado de polimerización
Hule
Látex
Lubricantes
Mero
Mezclas
Monómero
Orientación
Peso molecular
Plásticos
Plastificantes
Polimerización
Polímero
Polímeros con enlaces cruzados
Polímeros con memoria de forma
Polímeros en red
Polímeros lineales
Polímeros ramificados
Polimezclas
Reciclaje
Rellenos
Retardantes de flama
Siliconas
Temperatura de transición vítrea
Termofijos
Termoplásticos
Vulcanización

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., Hamser, 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 histerético 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 preparare 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 acídico, 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.

CAPÍTULO 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.

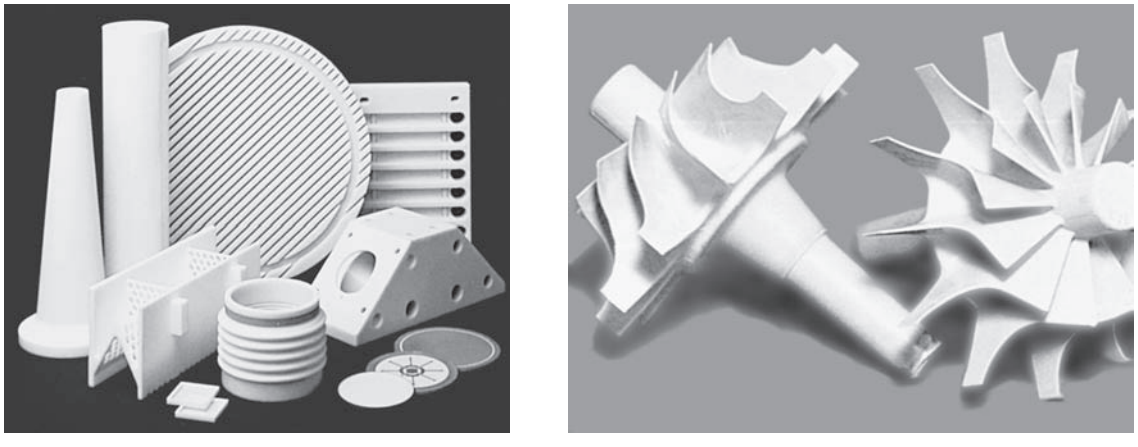
8.2 Estructura de los cerámicos

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



(a) (b)

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.

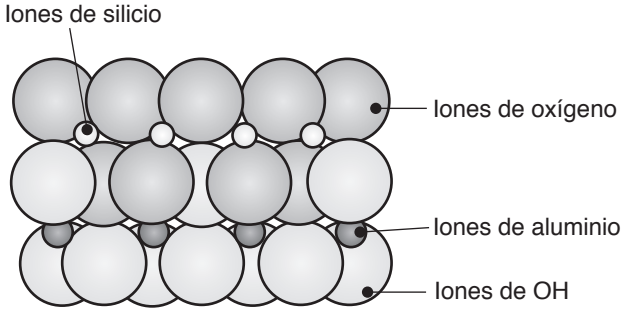


FIGURA 8.2 Estructura cristalina de la caolinita, conocida comúnmente como arcilla; compare esta figura con las figuras 1.3 a 1.5 para los metales.

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**

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 alta 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 pegan; 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 *si*licio, *al*uminio, *o*xígeno y *n*itrógeno, 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 *sílice*, 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.

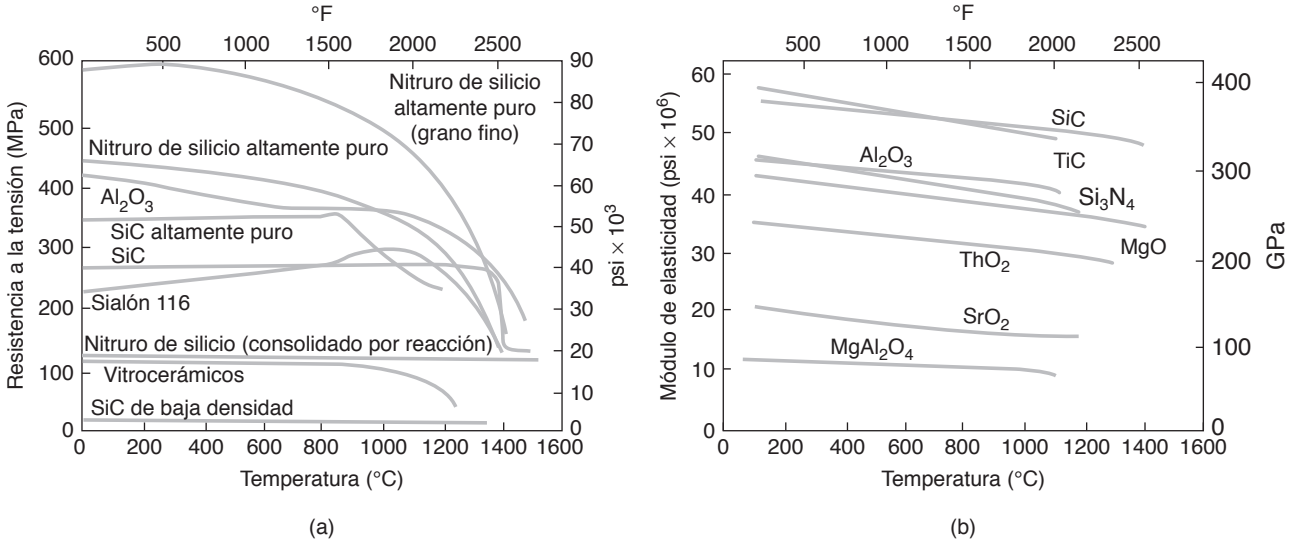


FIGURA 8.3 (a) Efecto de la temperatura sobre la resistencia de varios cerámicos ingenieriles; note que se mantiene una gran parte de la resistencia aun a temperaturas altas; compare esta gráfica con la figura 5.5. (b) Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad para diversos cerámicos; compare 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_2O_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_3N_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

$$\text{UTS} = \text{UTS}_o e^{-nP}, \tag{8.1}$$

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_o 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

$$E \simeq E_o(1 - 1.9P + 0.9P^2), \tag{8.2}$$

donde E_o 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 *pretensarse*, 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

$$k = k_o\,(1 - P), \tag{8.3}$$

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 térmicas 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 μm (5 μpulg) y rugosidad superficial de 0.02 μm (0.8 μpulg). 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

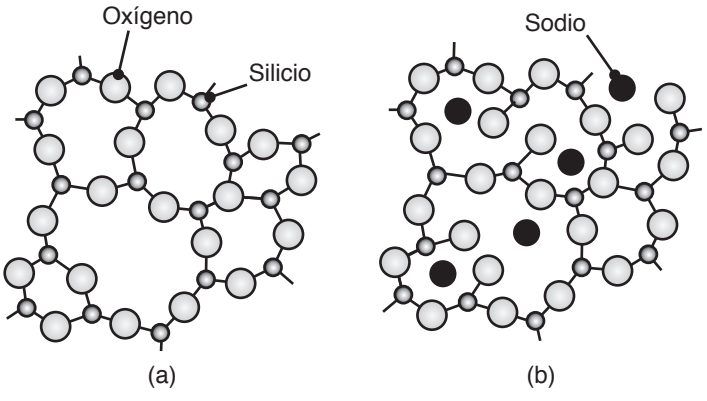


FIGURA 8.5 Ilustración esquemática de la estructura del vidrio de sílice. (a) Vidrio de sílice puro en la forma de estructura aleatoria $(SiO_2)_n$ y (b) vidrio parcialmente despolimerizado; note que existe un cuarto enlace para cada silicio que se encuentra fuera del plano mostrado.

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

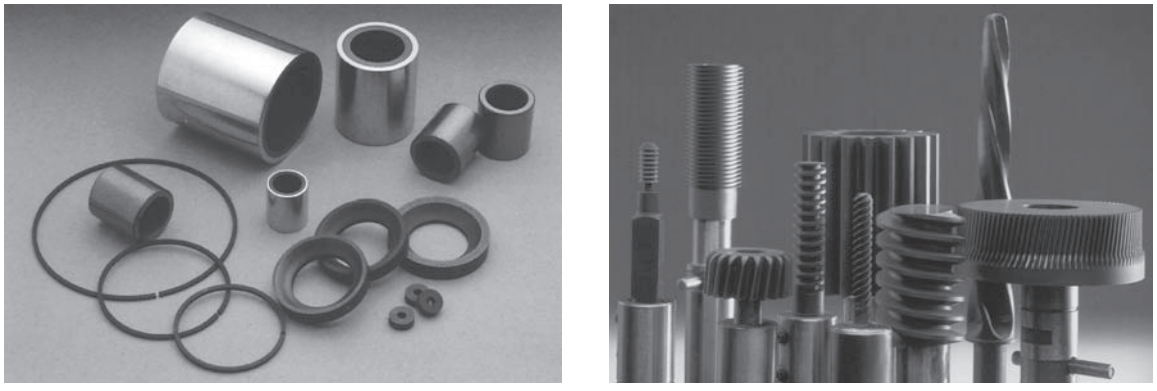
El *grafito* es una forma cristalina del carbono, tiene una *estructura en capas* con planos basales o láminas de átomos de carbono compactos (vea la figura 1.5); en consecuencia, el grafito es débil cuando se cizalla a lo largo de las capas. Esta característica, a su vez, da al grafito sus propiedades 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



(a) (b)

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 Unicor, 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 Fulerenos

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 fulerenos 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

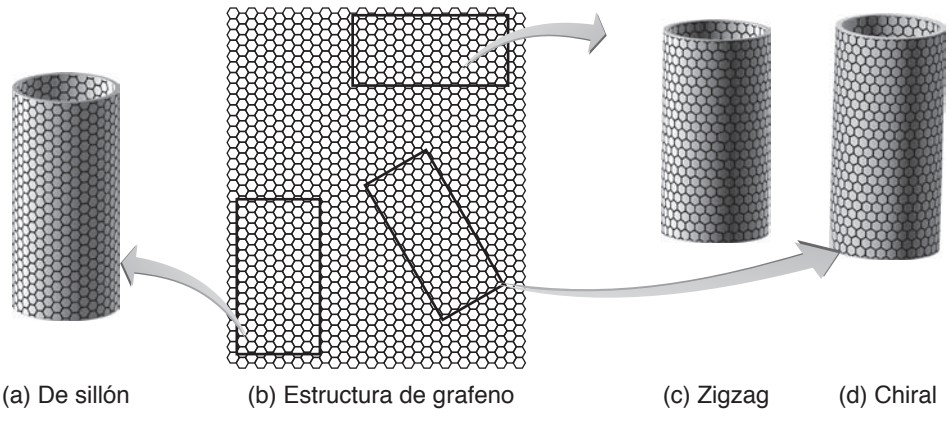


FIGURA 8.7 Formas de los nanotubos de carbono producidos a partir de una sección de grafeno: de sillón, zigzag y chiral. Los nanotubos de sillón se destacan por su alta conductividad eléctrica, mientras que los nanotubos en zigzag y chirales son semiconductores.

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 chiral 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. Electrodos 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 inertidad 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 fulerenos, 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
Arcilla
Biocerámicos
Bolas bucky
Carbono
Carbono tipo diamante
Carburos
Cerámicos
Cerámicos blancos
Cerámicos de nanofase
Cerámicos de óxido
Cerámicos industriales
Cermets
Desvitrificación
Diamante
Diamante industrial
Espuma de carbono
Fatiga estática
Feldespato
Fibras de vidrio
Formador de vidrio
Fulerenos
Grafeno
Grafito
Nanocerámicos
Nanotubos
Nanotubos de carbono
Nitruros
Pedernal
Porcelana
Porosidad
Sialón
Sílice
Vidrio
Vitrocerámicos
Zirconia
Zirconia endurecida por transformación
Zirconia parcialmente estabilizada

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 cermets? 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 compósito? 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 Obtenga 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 9

- 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 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

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,

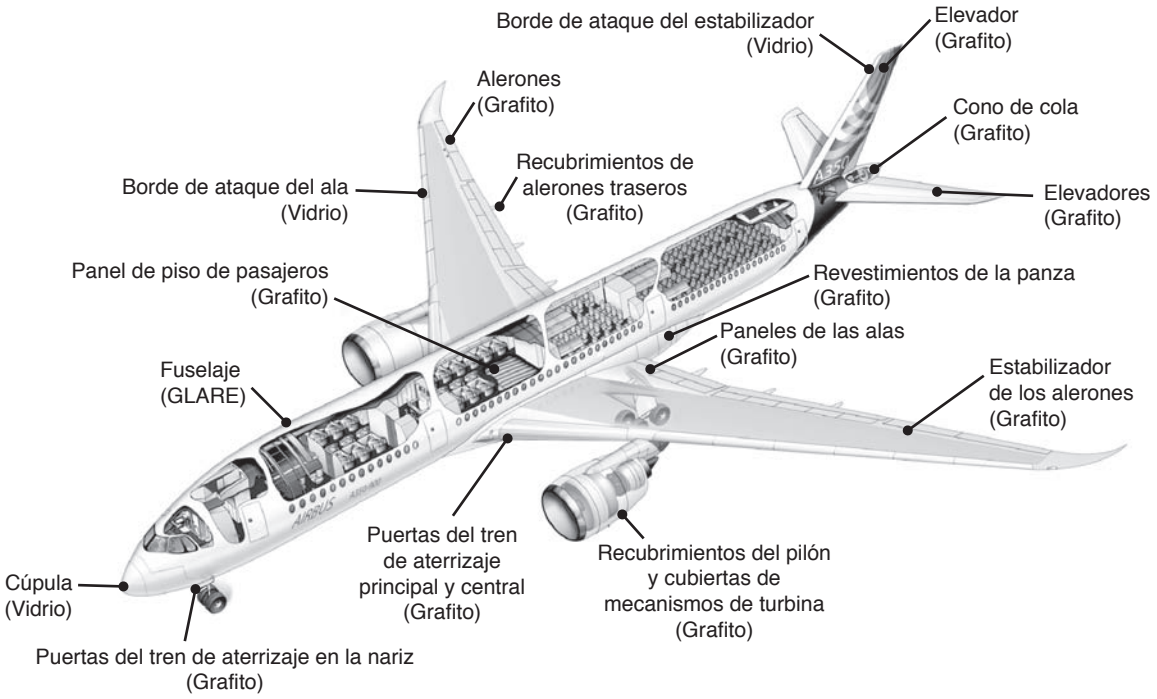


FIGURA 9.1 Aplicación de materiales compósitos avanzados en el Airbus 350. Se muestra el tipo de refuerzo, con el fuselaje hecho de GLARE (un laminado de polímero y aluminio reforzado con vidrio). *Fuente:* Reutilización cortesía de Flight Global, http://www.flightglobal.com/news/articles/paris-air-show-a350-xwb-ready-to-rock-327500/.

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).

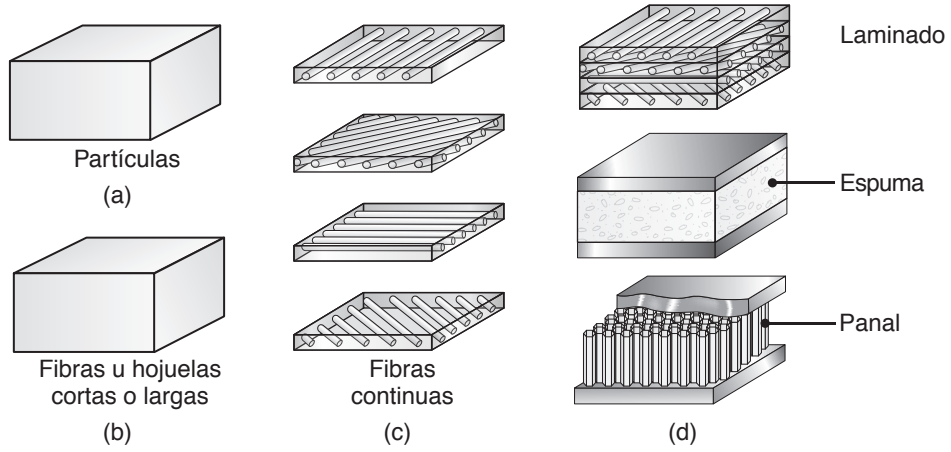


FIGURA 9.2 Ilustración esquemática de los métodos de refuerzo utilizados para plásticos (matriz) con (a) partículas, (b) fibras u hojuelas cortas o largas y (c) fibras continuas. Las estructuras laminadas que se muestran en (d) pueden producirse a partir de capas de fibras continuas o estructuras en 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 magnesia) 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 poliimidas.
Termoplásticos	Polieteretercetona; 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.

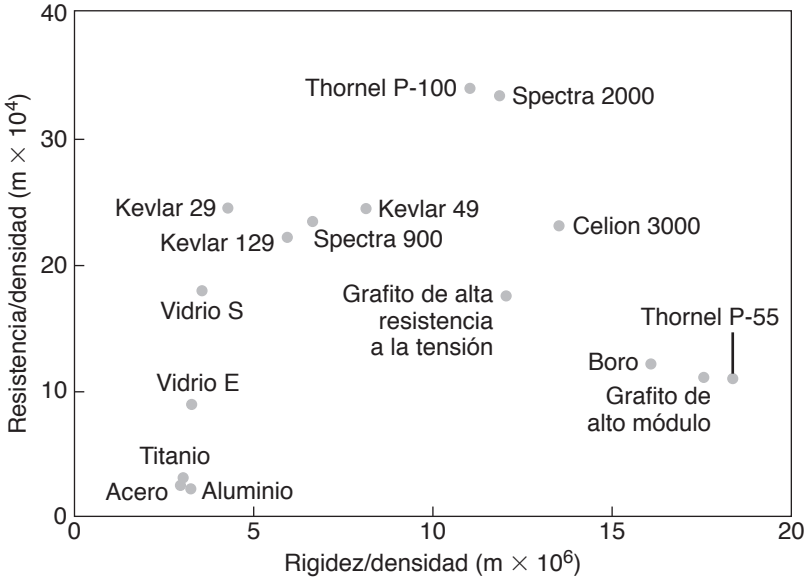


FIGURA 9.3 Resistencia a la tensión específica (relación de resistencia a la tensión sobre la densidad) y módulo de tensión específico (relación del módulo de elasticidad sobre la densidad) para diversas fibras usadas en plásticos reforzados; observe el amplio rango disponible para la resistencia y la 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 compósito 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 compósito 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 (desnitrogenación) del PAN. Las temperaturas de carbonización llegan aproximadamente hasta 1500 °C (2730 °F); para la grafitización, hasta 3000 °C (5400 °F).

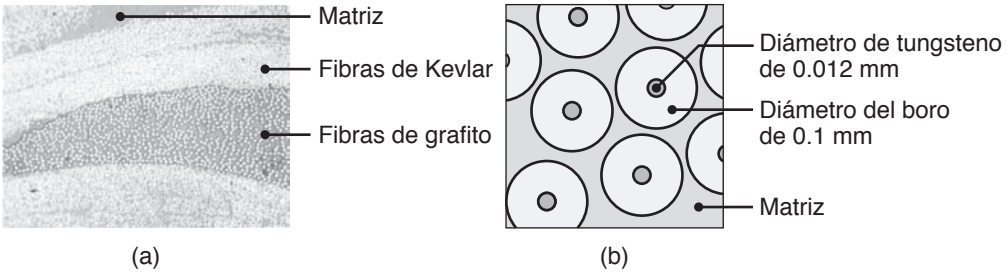


FIGURA 9.4 (a) Sección transversal de una raqueta de tenis, mostrando las fibras de refuerzo de grafito y aramida (Kevlar). *Fuente:* Cortesía de F. Garrett, Wilson Sporting Goods Co. (b) Sección transversal de un material compósito reforzado con fibra de boro.

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 μm de espesor sobre un núcleo de fibra de grafito con diámetro de 7 μm. 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 μm (40 y 400 μpulg) 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

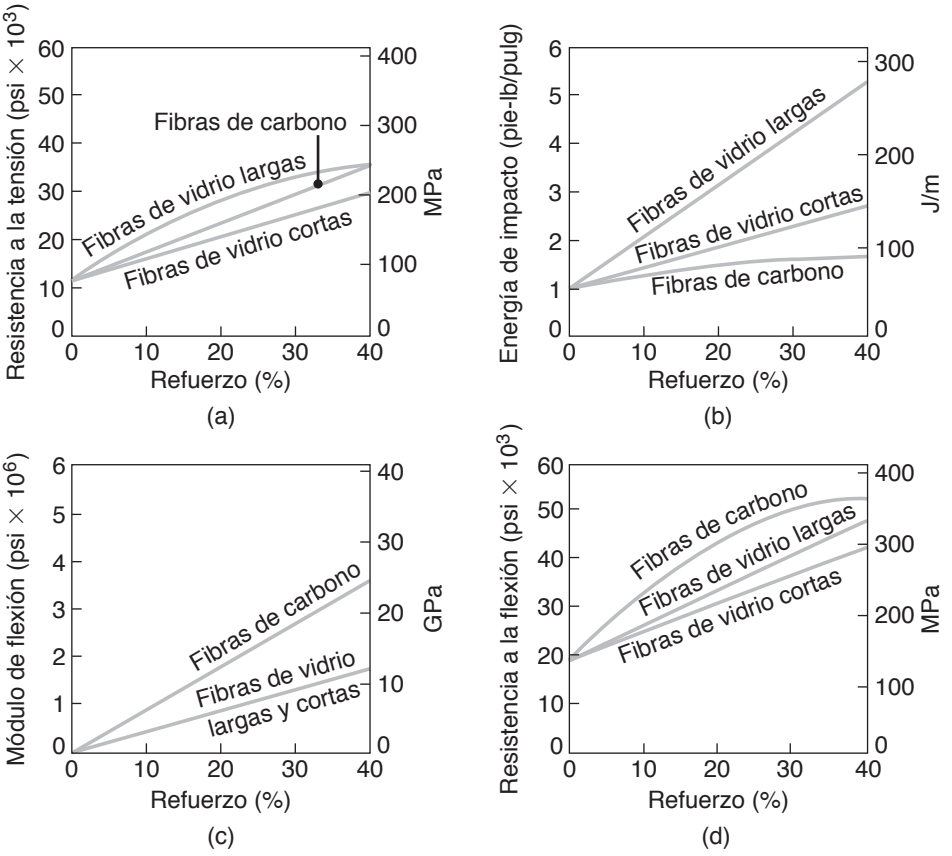
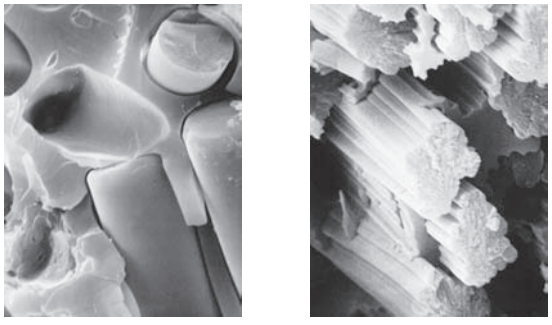


FIGURA 9.5 Efecto del tipo de fibra sobre las diversas propiedades del nailon (6,6) reforzado con fibra. *Fuente:* Cortesía de la NASA.



(a) (b)

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 compósito 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.

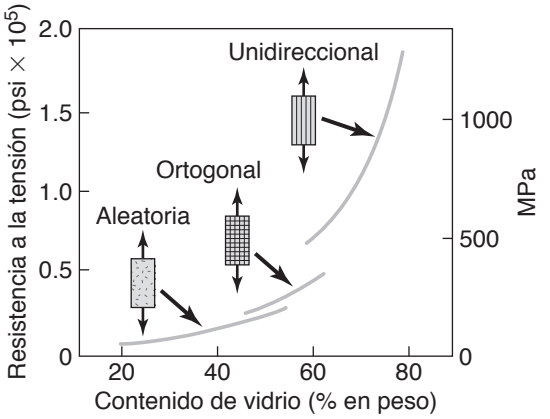


FIGURA 9.7 Resistencia a la tensión del poliéster reforzado con vidrio como una función del contenido de fibra y de la dirección de las fibras en la matriz.

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 compósito. En las siguientes ecuaciones, *c* se refiere al compósito, *f* a la fibra y *m* a la matriz. La carga de tensión total, P_c, sobre el compósito es compartida por la fibra (P_f) y la matriz (P_m). Por lo tanto,

$$P_c = P_f + P_m, \tag{9.1}$$

que se puede escribir como

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m, \tag{9.2}$$

donde A_c, A_f y A_m son las áreas de sección transversal del material compósito, 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 compósito. (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

$$\sigma_c = x\sigma_f + (1 - x)\sigma_m. \tag{9.3}$$

Ahora es posible calcular la fracción de la carga total soportada por las fibras. En primer lugar, observe que en el compósito 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,

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{A_f E_f}{A_m E_m}. \tag{9.4}$$

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 compósito puede calcularse al sustituir σ en la ecuación (9.3) por E. Así,

$$E_c = xE_f + (1 - x)E_m. \tag{9.5}$$

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),

$$E_c = 0.2(300) + (1 - 0.2)100$$
$$= 60 + 80 = 140 \text{ GPa}.$$

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

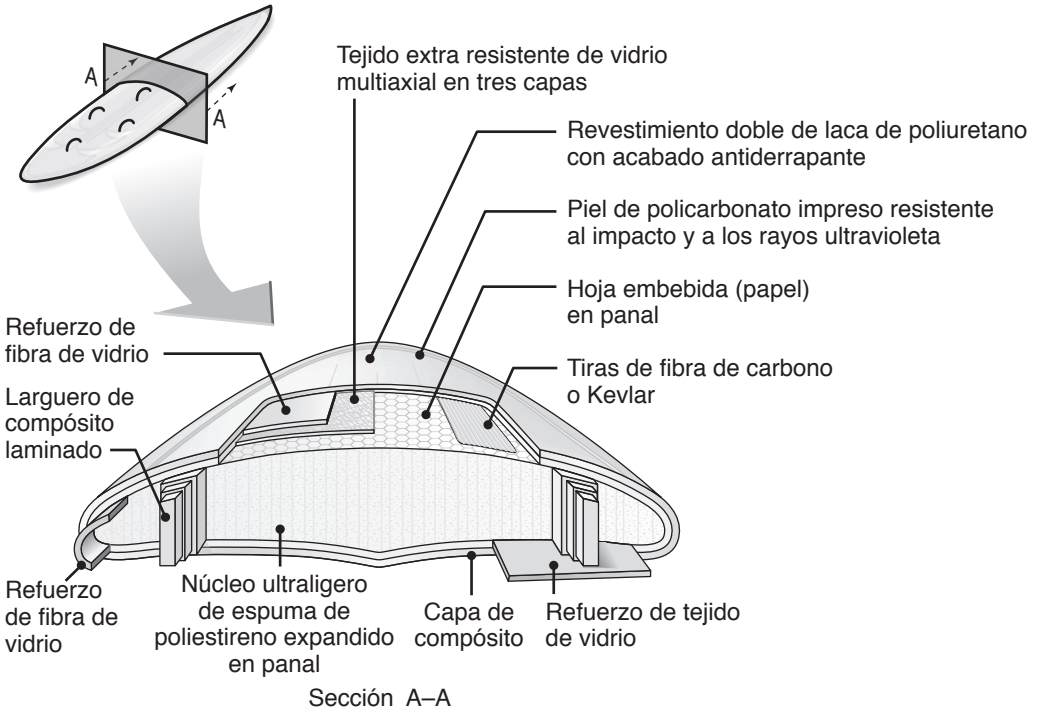


FIGURA 9.8 Sección transversal de una tabla para surfeo hecha de materiales compósitos, un ejemplo de la construcción con materiales avanzados. *Fuente:* K. Easterling, *Tomorrow's Materials*, 2a. ed., Institute of Metals, 1990. Cortesía de Maney Publishing. www.maneypublishing.com

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 compósitos

El uso de equipos de protección personal, en forma de chalecos antibalas y cascos compósitos, se ha venido generalizando en los ámbitos militares y policiacos. Los chalecos antibalas se basan en fibras tejidas de gran resistencia que impiden la penetración de proyectiles. Para detener una bala, un material compósito primero debe deformarse o aplanarse, proceso que tiene lugar cuando la punta de la bala entra en contacto con tantas fibras individuales del material compósito 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*)

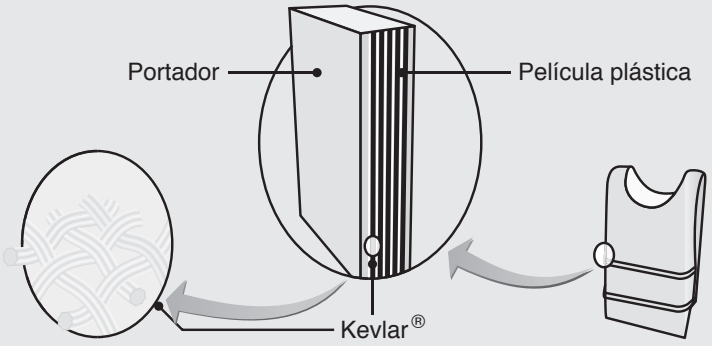


FIGURA 9.9 Ilustración esquemática de un chaleco antibalas que muestra las capas de fibras tejidas.

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 (base de cobalto)	Componentes de motor para altas temperaturas.
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 nanocristalina, 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 compósito utilizados para una mordaza de frenos de automóvil

Propiedad	Fibra de alúmina	Material compósito 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 compósito 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

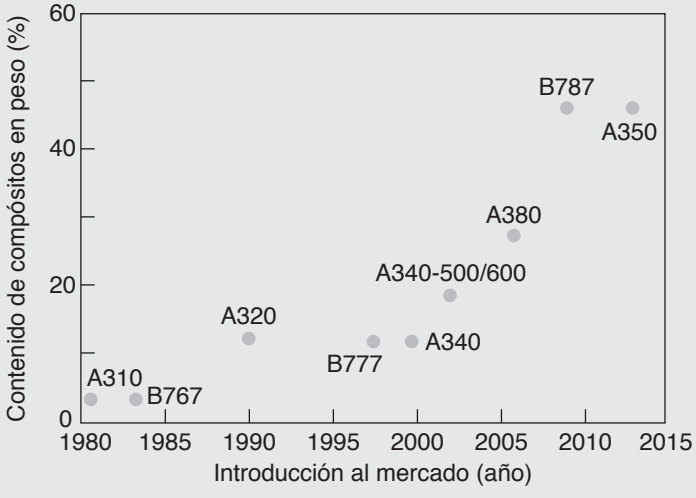


FIGURA 9.12 Contenido de materiales compósitos en los aviones comerciales seleccionados en función del tiempo (medido desde su fecha de introducción al mercado). A = Airbus, B = Boeing.

(*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.

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.

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 pulg^2 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?

9.43 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 anisótropicas.

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 surfeo ilustrada 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.

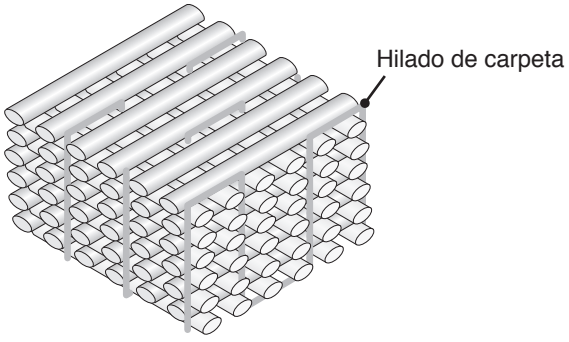


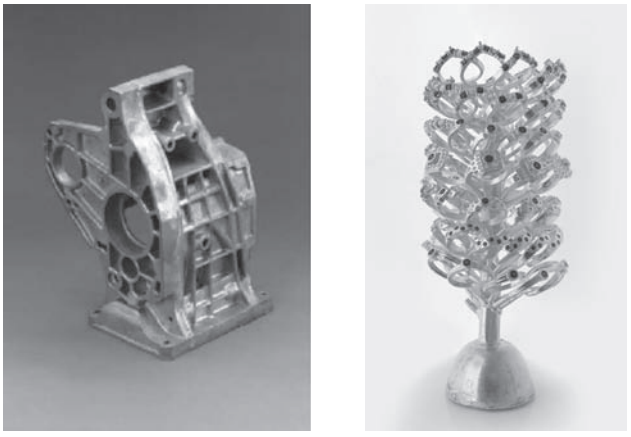
FIGURA P9.65

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.

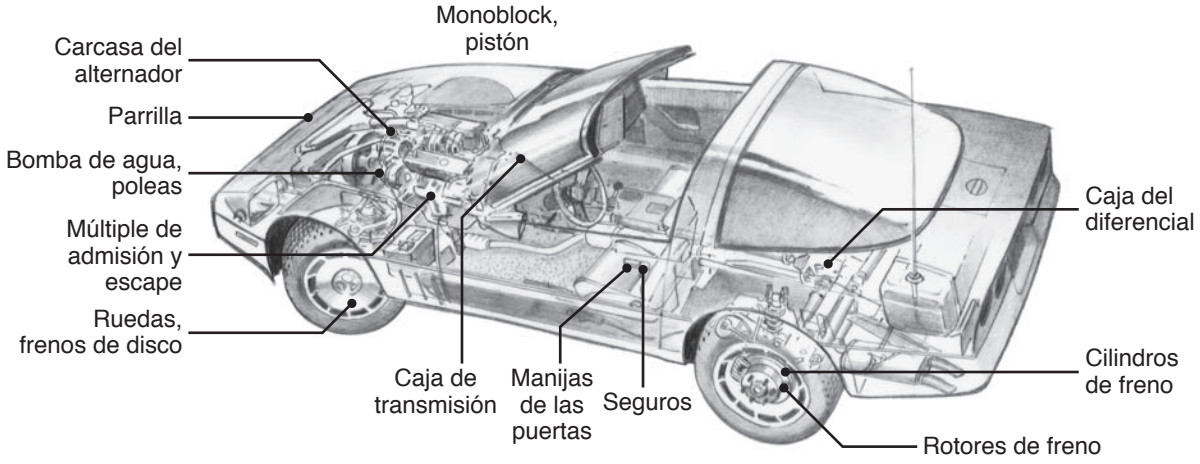


FIGURA II.2 Partes fundidas presentes en un automóvil típico.

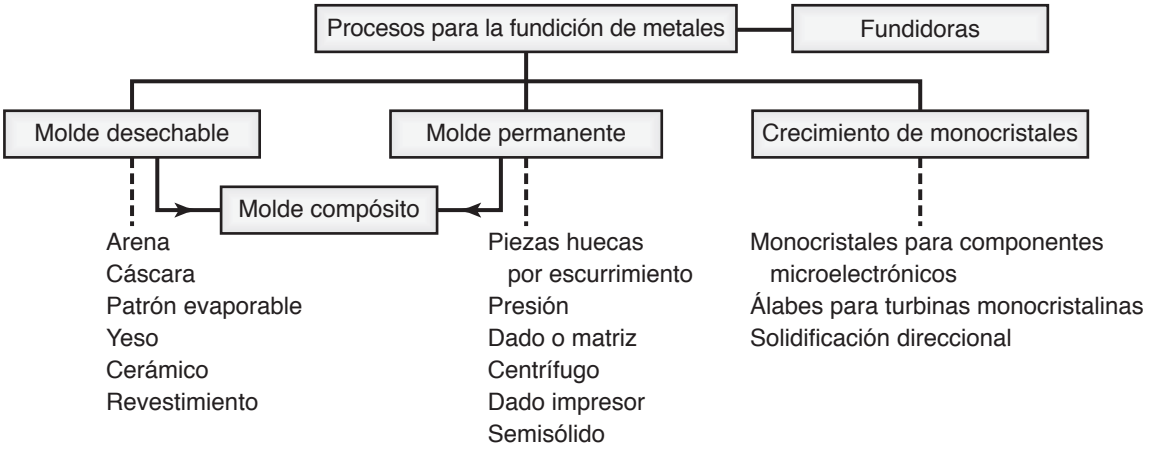


FIGURA II.3 Esquema de los procesos para fundición de metales descritos en la parte II de este libro.

- 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-

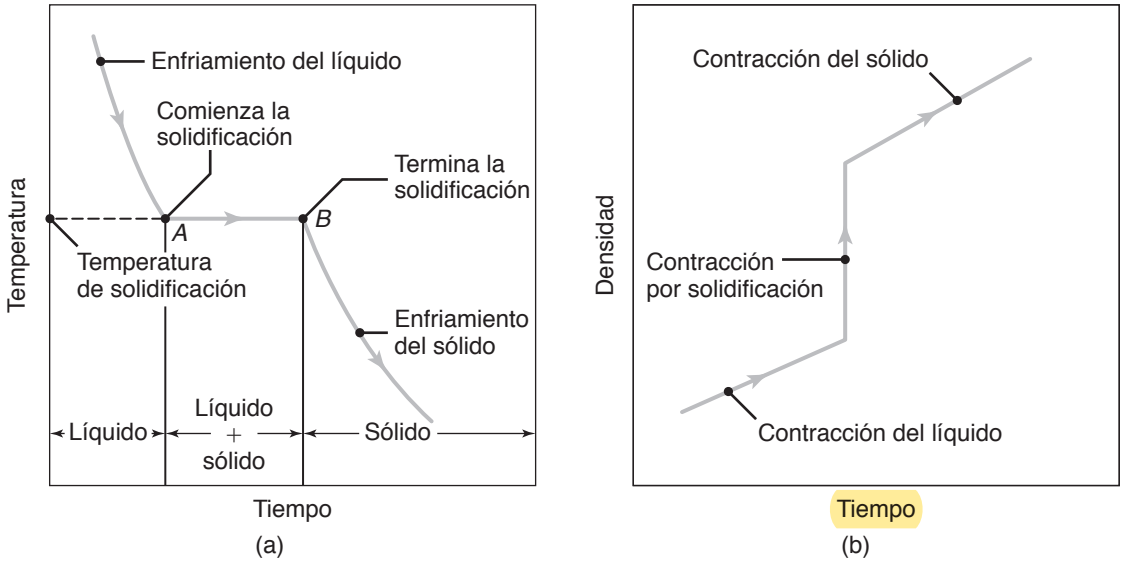


FIGURA 10.1 (a) Temperatura como una función del tiempo para la solidificación de los metales puros; observe que la solidificación ocurre a una temperatura constante. (b) Densidad como una función del tiempo.

bién al solidificarse. Ésta es una consideración importante ya que la contracción puede conducir al microagrietamiento 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.

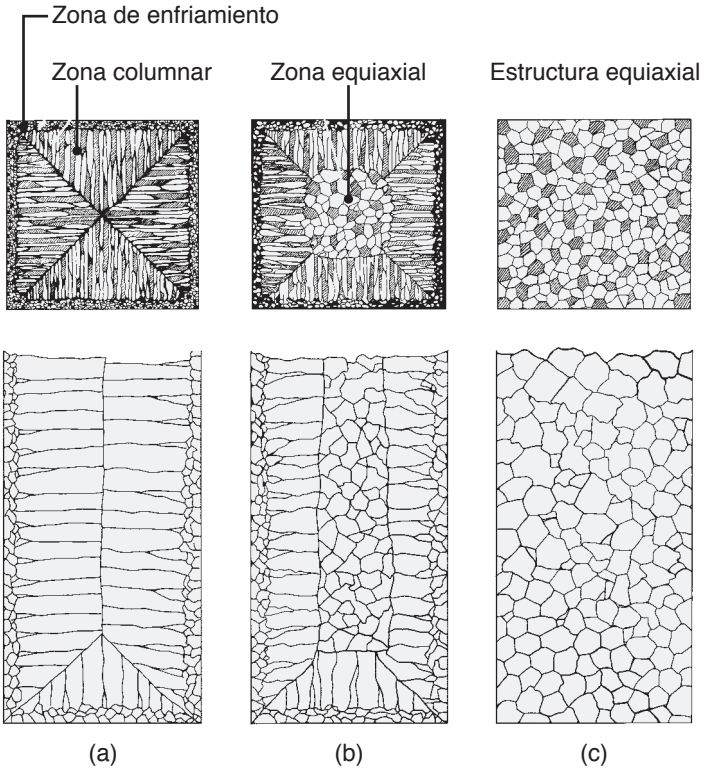


FIGURA 10.2 Ilustración esquemática de tres estructuras fundidas de metales solidificados en un molde cuadrado: (a) metales puros; (b) aleaciones en solución sólida; (c) estructura obtenida usando agentes de nucleación. *Fuente:* Según G. W. Form, J. F. Wallace, J. L. Walker y A. Cibula.

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 *drys*, 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.

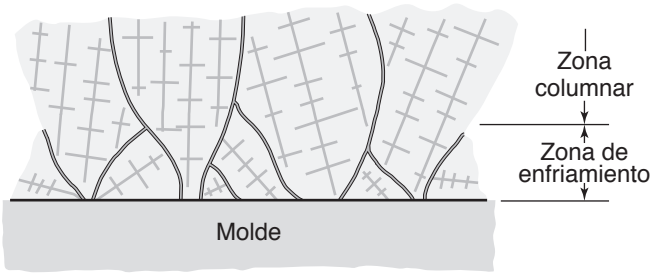


FIGURA 10.3 Desarrollo de una textura preferencial en una pared fría del molde; observe que lejos de la superficie del molde sólo crecen granos orientados favorablemente.

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:

$$\text{Rango de solidificación} = T_L - T_S. \tag{10.1}$$

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

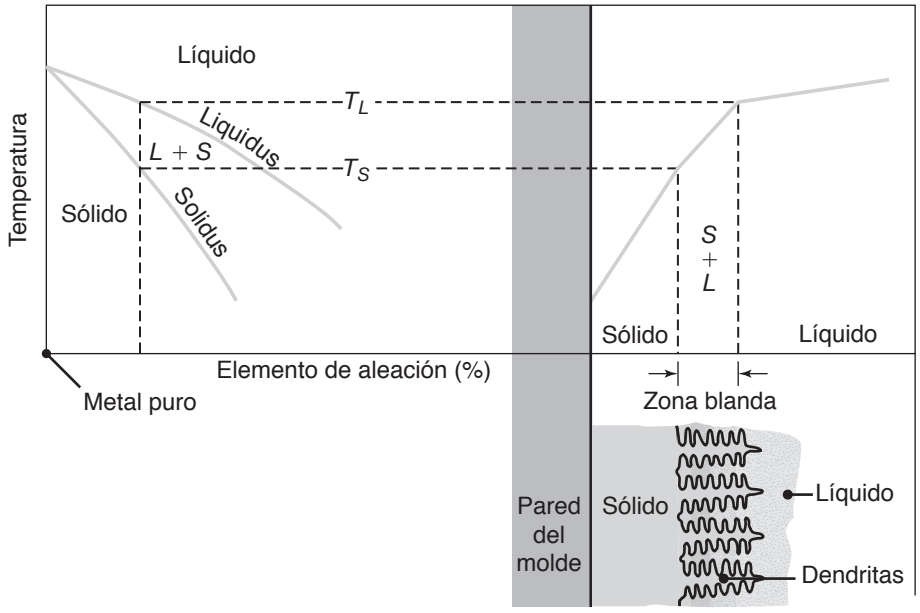


FIGURA 10.4 Ilustración esquemática de la solidificación de una aleación y distribución de la temperatura en el metal en solidificación; observe la formación de dendritas en la zona blanda o pastosa.

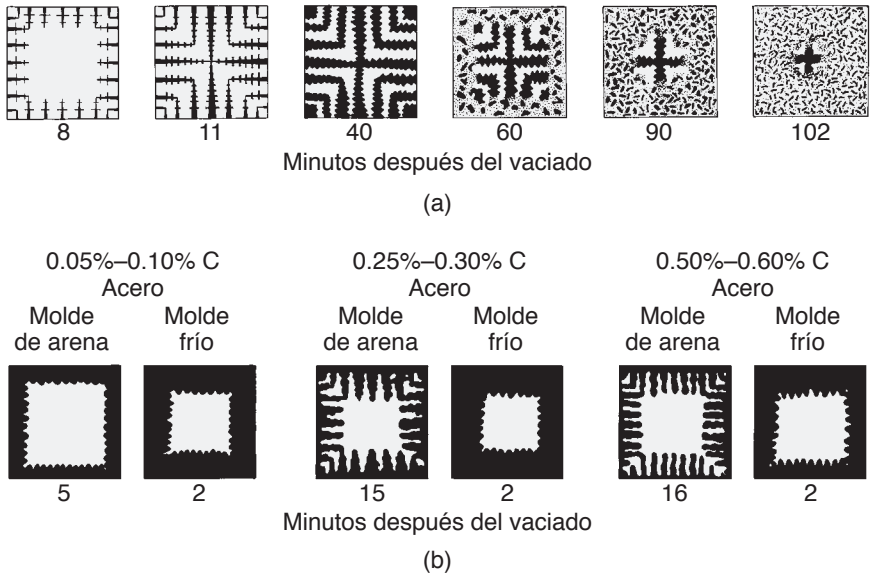


FIGURA 10.5 (a) Patrones de solidificación para el hierro fundido gris en una fundición cuadrada de 180 mm (7 pulg). Observe que después de 11 minutos de enfriamiento, las dendritas se alcanzan entre sí, pero la fundición aún está blanda en su totalidad; esta fundición tarda aproximadamente 2 horas en 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-

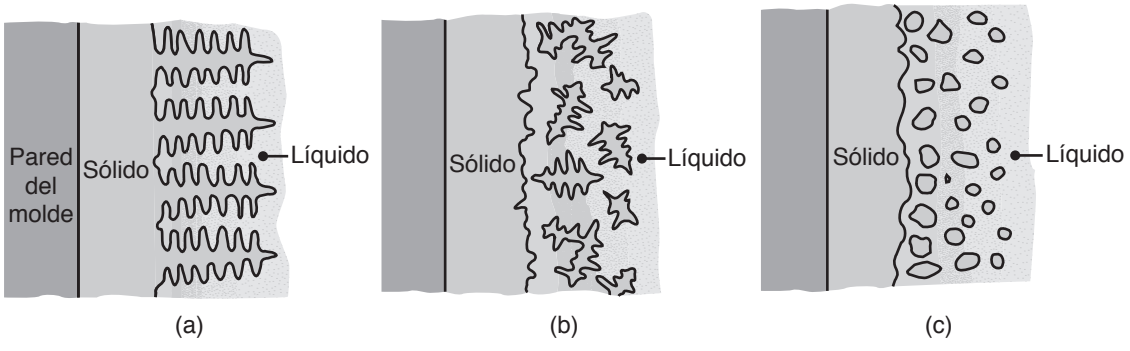


FIGURA 10.6 Ilustración esquemática de tres tipos básicos de estructuras de fundición: (a) dendríticas columnares; (b) dendríticas equiaxiales y (c) no dendríticas equiaxiales. *Fuente:* Cortesía de D. Apelian.

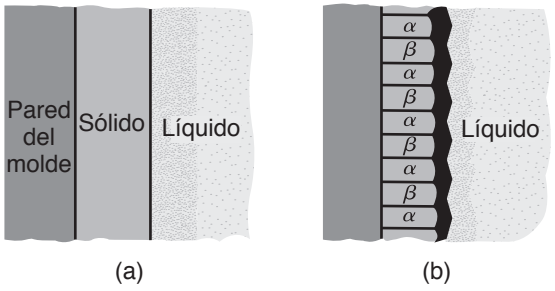


FIGURA 10.7 Ilustración esquemática de las estructuras de fundición en (a) un plano frontal, estructura monofásica, y (b) un plano frontal, estructura bifásica. *Fuente:* Cortesía de D. Apelian.

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, los 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

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante}, \tag{10.2}$$

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:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + f, \tag{10.3}$$

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

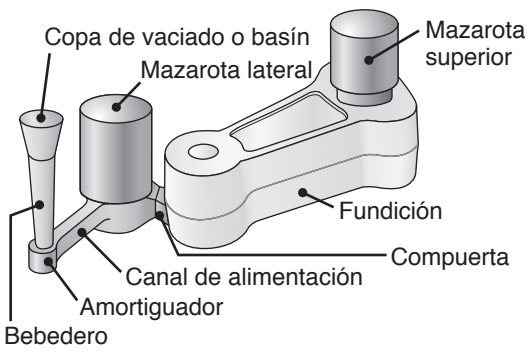


FIGURA 10.8 Ilustración esquemática de una fundición con sistema de alimentación y mazarotas. Las mazarotas sirven como depósitos al suministrar el metal fundido a la pieza fundida conforme ésta se contrae durante la solidificación.

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,

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2, \tag{10.4}$$

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

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}, \tag{10.5}$$

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:

$$\mathrm{Re} = \frac{vD\rho}{\eta}\,, \tag{10.6}$$

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 Fluidez del metal fundido

La capacidad del metal fundido para llenar las cavidades del molde se denomina *fluidez*, 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 fluidez, sino también la naturaleza de las prácticas de fundición.

Las siguientes características del metal fundido influyen en la fluidez:

1. Viscosidad. A medida que la viscosidad y su sensibilidad a la temperatura aumentan, la fluidez disminuye.

2. Tensión superficial. Una alta tensión superficial del metal líquido reduce la fluidez. Debido a esto, las películas de óxido presentes sobre la superficie del metal fundido tienen un efecto adverso significativo en la fluidez; 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 fluidez. 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 fluidez.

4. Patrón de solidificación de la aleación. La manera en que ocurre la solidificación (sección 10.2) puede influir en la fluidez. Por otra parte, la fluidez es inversamente proporcional al rango de solidificación: cuanto más corto sea el rango (como en los metales puros y eutécticos), mayor será la fluidez. Por el contrario, las aleaciones con intervalos de solidificación largos (como las aleaciones de solución sólida) tienen menor fluidez.

Los siguientes parámetros de fundición influyen en la fluidez 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 fluidez.

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 fluidez del metal fundido. Aunque el calentamiento del molde mejora la fluidez, 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 fluidez 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 fluidez, 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.

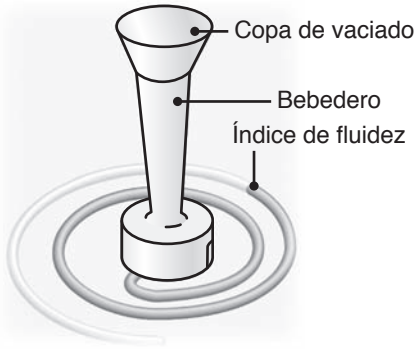


FIGURA 10.9 Método de prueba de fluidez usando un molde en espiral. El índice de fluidez es la longitud del metal solidificado en el paso de la espiral; cuanto mayor sea la longitud del metal solidificado, mayor será la fluidez del metal.

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

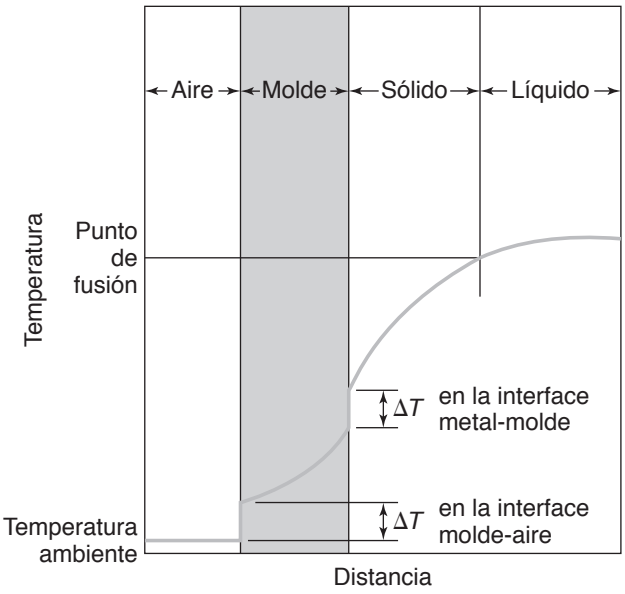


FIGURA 10.10 Distribución de la temperatura en la interfase de la pared del molde y el metal líquido durante la solidificación de los metales presentes en la fundición.

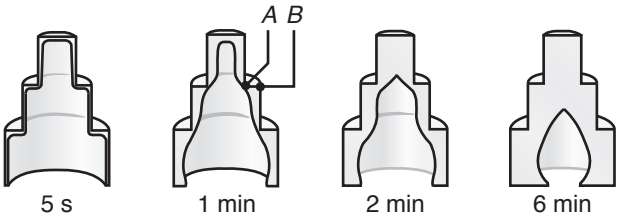


FIGURA 10.11 Capa o piel solidificada en una fundición de acero. El metal fundido restante se vierte en los tiempos indicados en la figura. Algunos objetos ornamentales y decorativos huecos son hechos mediante un proceso llamado fundición de piezas huecas por escurrimiento, el cual se basa en este principio. *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:

$$V = \pi r^2 h = 2\pi r^3, \quad r = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{1/3},$$

$$A = 2\pi r^2 + 2\pi rh$$

$$= 6\pi r^2 = 6\pi\left(\frac{1}{2\pi}\right)^{2/3} = 5.54.$$

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.

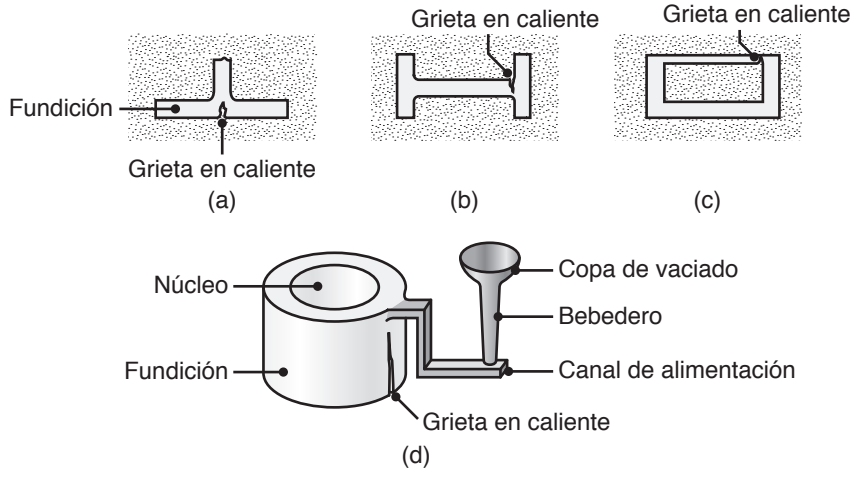


FIGURA 10.12 Ejemplos de grietas en caliente en fundiciones. Estos defectos se producen debido a que la fundición no puede contraerse libremente durante el enfriamiento por limitaciones en diversas partes de los moldes y núcleos. Para controlar el enfriamiento en las secciones críticas y evitar las grietas en caliente, pueden usarse compuestos exotérmicos (que generan calor, por ejemplo un compensador exotérmico).

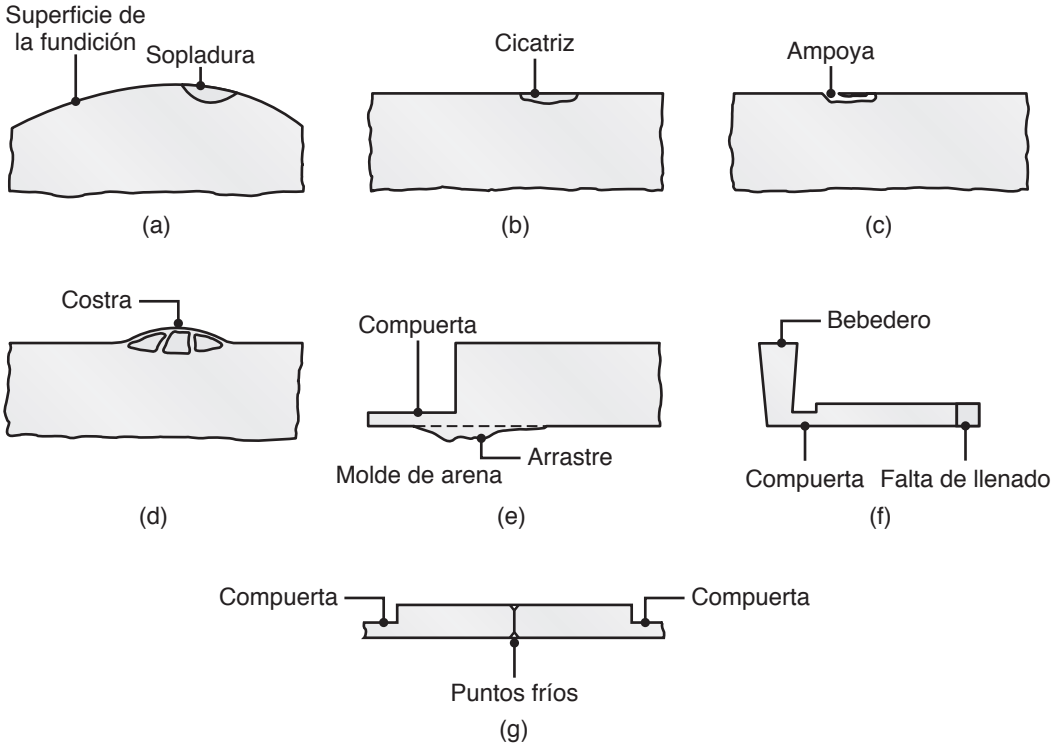


FIGURA 10.13 Ejemplos de defectos comunes en fundiciones; estos defectos pueden minimizarse o eliminarse mediante el diseño apropiado y una preparación adecuada de los moldes, así como al controlar los procedimientos de vaciado. *Fuente:* Según J. Datsko.

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:

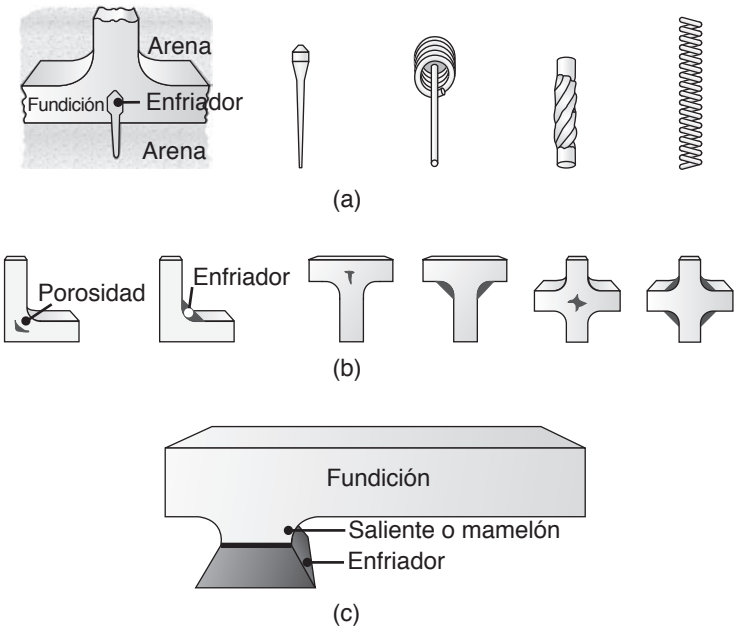


FIGURA 10.14 Diversos tipos de enfriadores (a) internos y (b) externos (áreas oscuras en las esquinas) utilizados en las fundiciones para eliminar la porosidad causada por contracción. Los enfriadores se colocan en las regiones donde hay mayor volumen de metal, como se muestra en (c).

- 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).

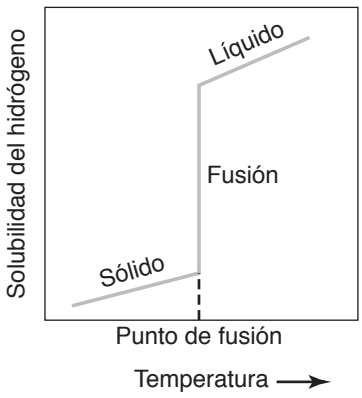


FIGURA 10.15 Solubilidad del hidrógeno en aluminio; observe la abrupta disminución de la solubilidad a medida que el metal fundido comienza a solidificarse.

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

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
Bebedero
Canal de alimentación
Compuerta
Contracción
Copa de vaciado
Dendrita
Dendrita columnar
Dendrita nucleada
Enfriadores
Fluidez
Fundición
Grano columnar
Inoculante
Macrosegregación
Mazarota
Microsegregación
Molde
Nucleación heterogénea
Nucleación homogénea
Número de Reynolds
Piel (película)
Porosidad
Rango de solidificación
Reofundición
Segregación
Segregación normal
Sistema de alimentación
Solidificación
Teorema de Bernoulli
Turbulencia
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.

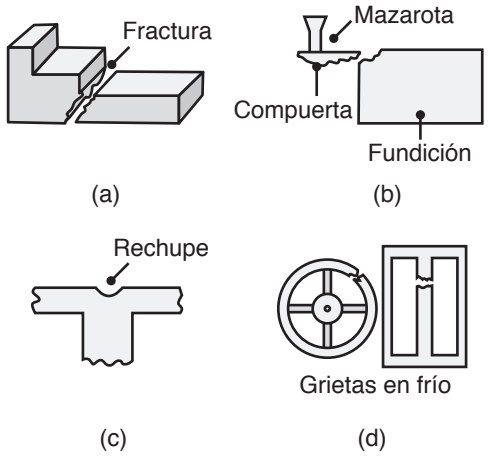


FIGURA P10.55

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.

CAPÍTULO

11 Procesos y equipos de fundición de metales

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.

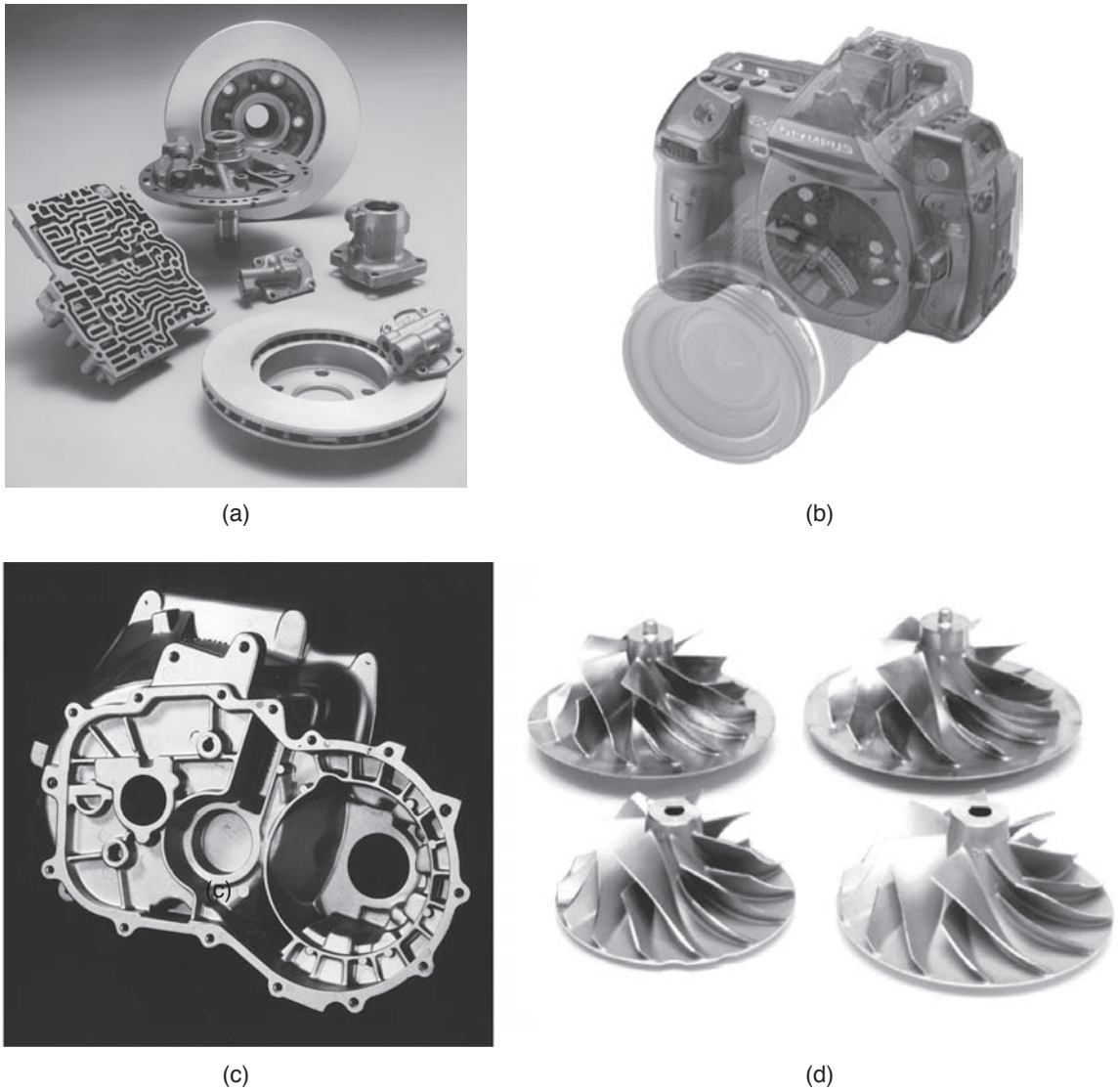


FIGURA 11.1 (a) Fundiciones típicas de hierro gris utilizadas en automóviles, incluyendo el cuerpo de la válvula de transmisión (izquierda) y el rotor del eje con cilindro de freno de disco (frente). *Fuente:* Cortesía de la división central de fundiciones de General Motors Corporation. (b) Carcasa de 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

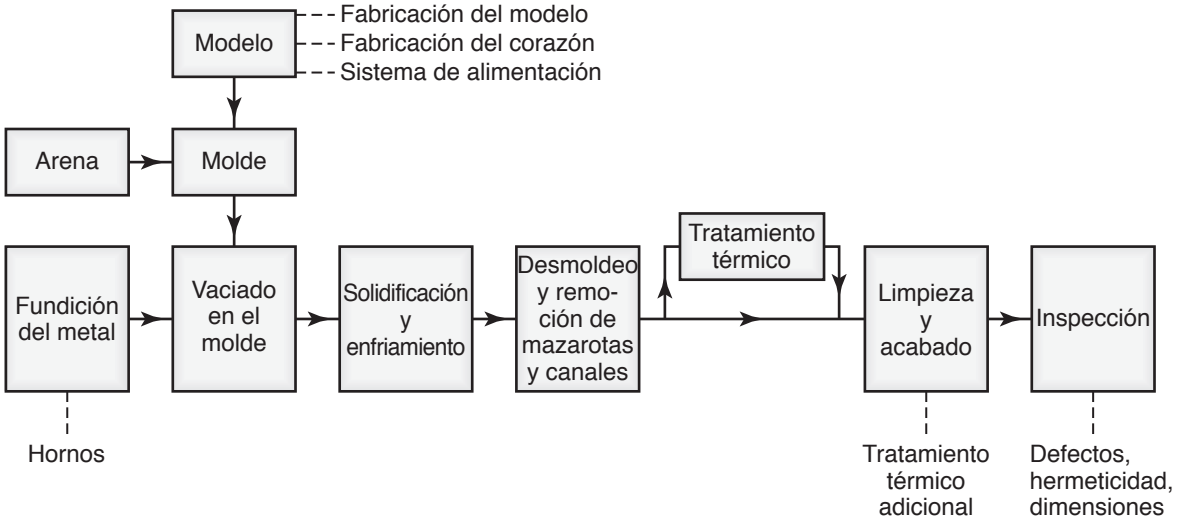


FIGURA 11.2 Esquema de las etapas de producción en una operación típica de fundición en arena.

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.

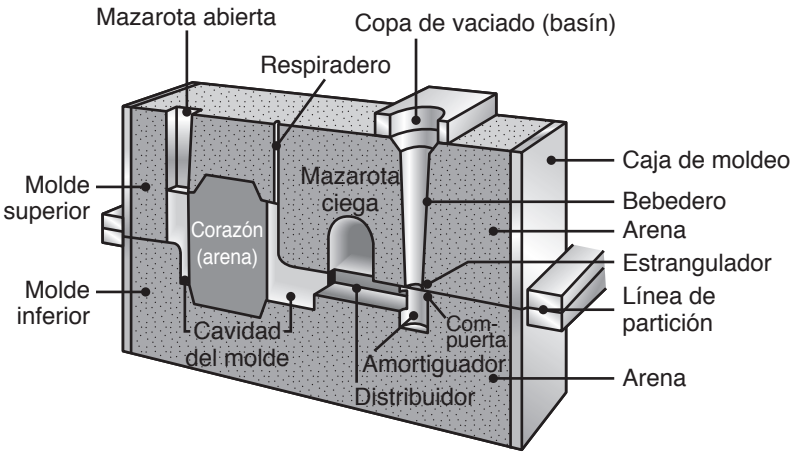


FIGURA 11.3 Ilustración esquemática de un molde de arena para mostrar diversas características.

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.

Código QR 11.1 Producción de corazón de arena. (*Fuente:* Cortesía de Alcast Technologies, Ltd.).

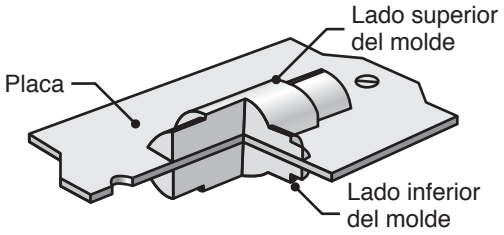


FIGURA 11.4 Modelo de placa bipartida típico usado en la fundición en arena.

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.

Código QR 11.2 Fundición en arena usando métodos de moldeo manuales. (*Fuente:* Cortesía de Alcast Technologies, Ltd.).

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.

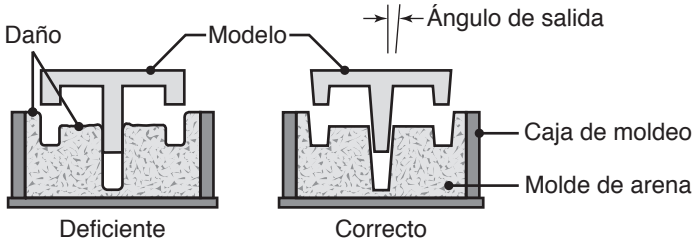


FIGURA 11.5 Ahusamiento o ángulo de salida en los modelos para facilitar la extracción del molde de arena.

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

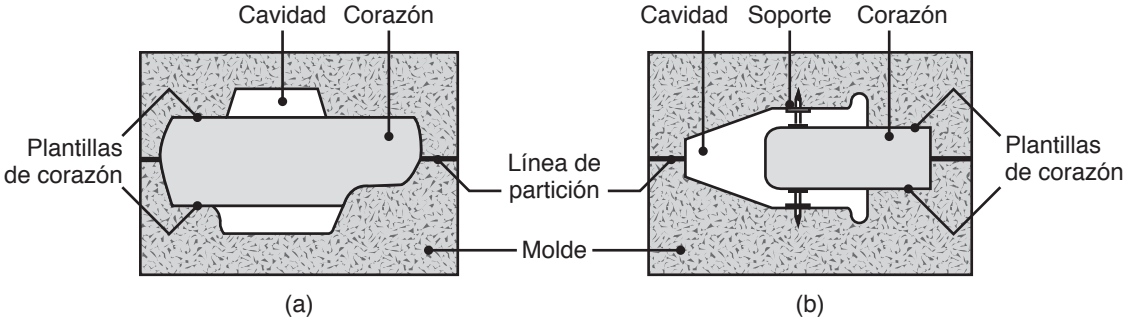


FIGURA 11.6 Ejemplos de corazones de arena mostrando plantillas de corazón y soportes para fijar los corazones.

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.).

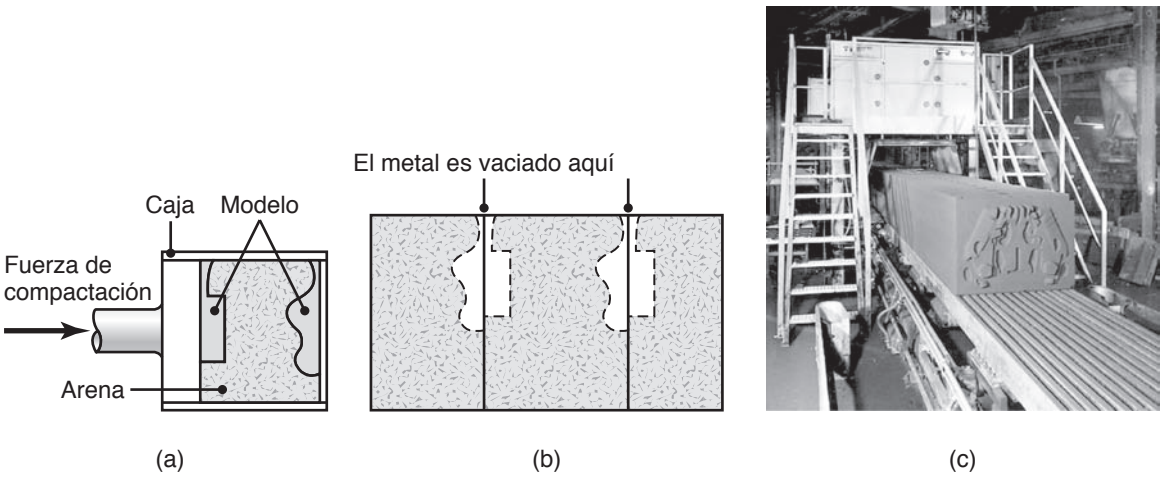


FIGURA 11.7 Moldeo vertical sin caja. (a) La arena se comprime entre las dos mitades del modelo. (b) Los moldes ensamblados pasan a lo largo de una línea de ensamble para el vaciado. (c) Fotografía de una línea de moldeo vertical sin caja. *Fuente:* Cortesía de la American Foundry Society.

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.

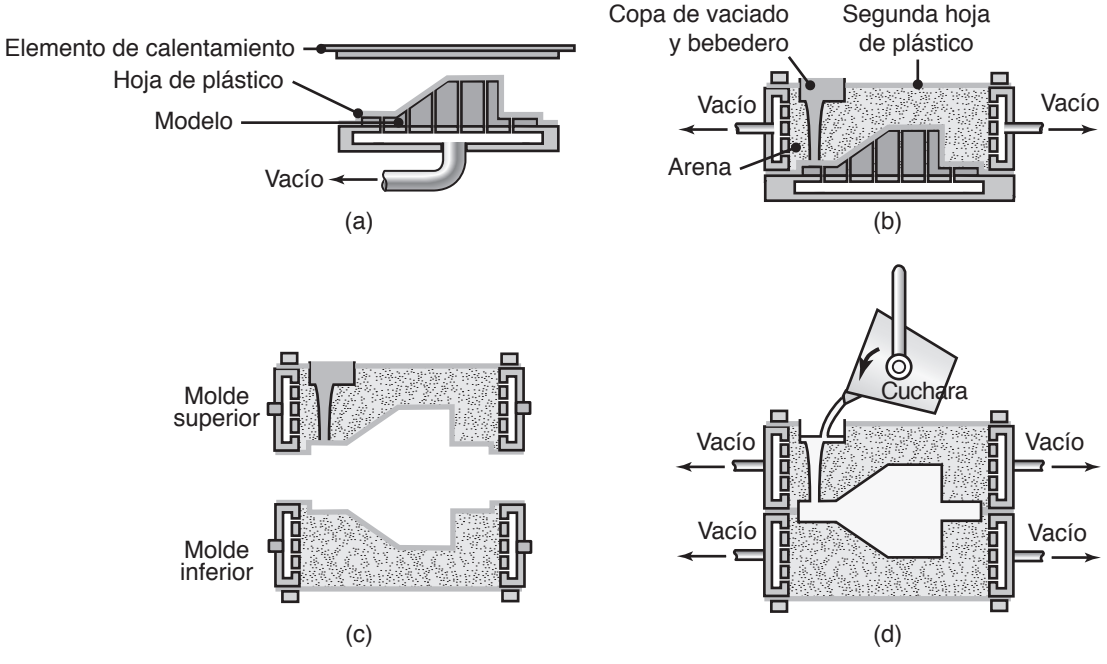


FIGURA 11.8 Proceso de moldeo por vacío. (a) Una hoja de plástico es termoformada (vea la sección 19.6) sobre un modelo; (b) una caja de moldeo por vacío se coloca sobre el modelo, se ubica un inserto de copa de vaciado y bebedero y la caja de moldeo se llena con arena. Una segunda hoja se coloca en 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 moldeado 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.

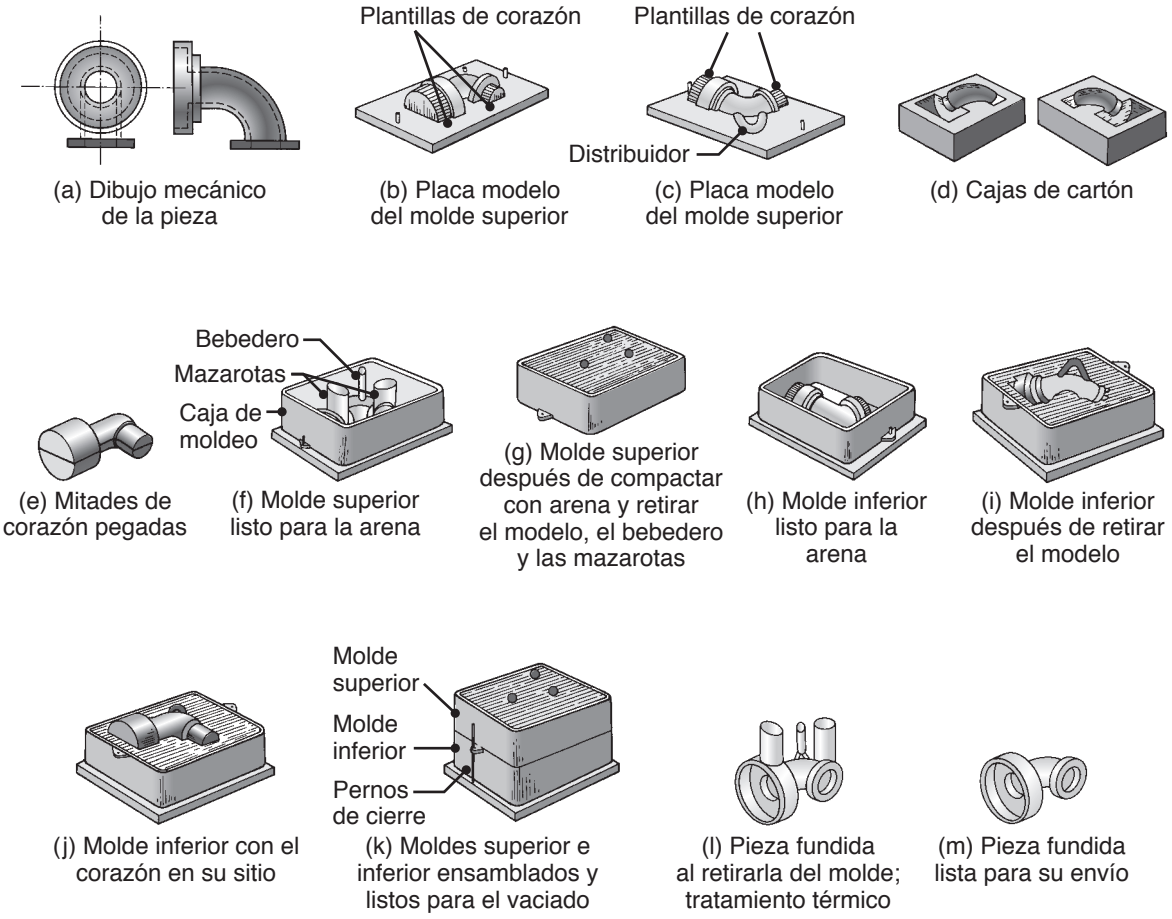


FIGURA 11.9 Ilustración esquemática de la secuencia de operaciones para la fundición en arena. (a) Se usa un dibujo mecánico de la pieza para generar un diseño del modelo. En el dibujo deben incorporarse consideraciones como la contracción y el ángulo de salida de la pieza. (b) y (c) Los modelos han 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.

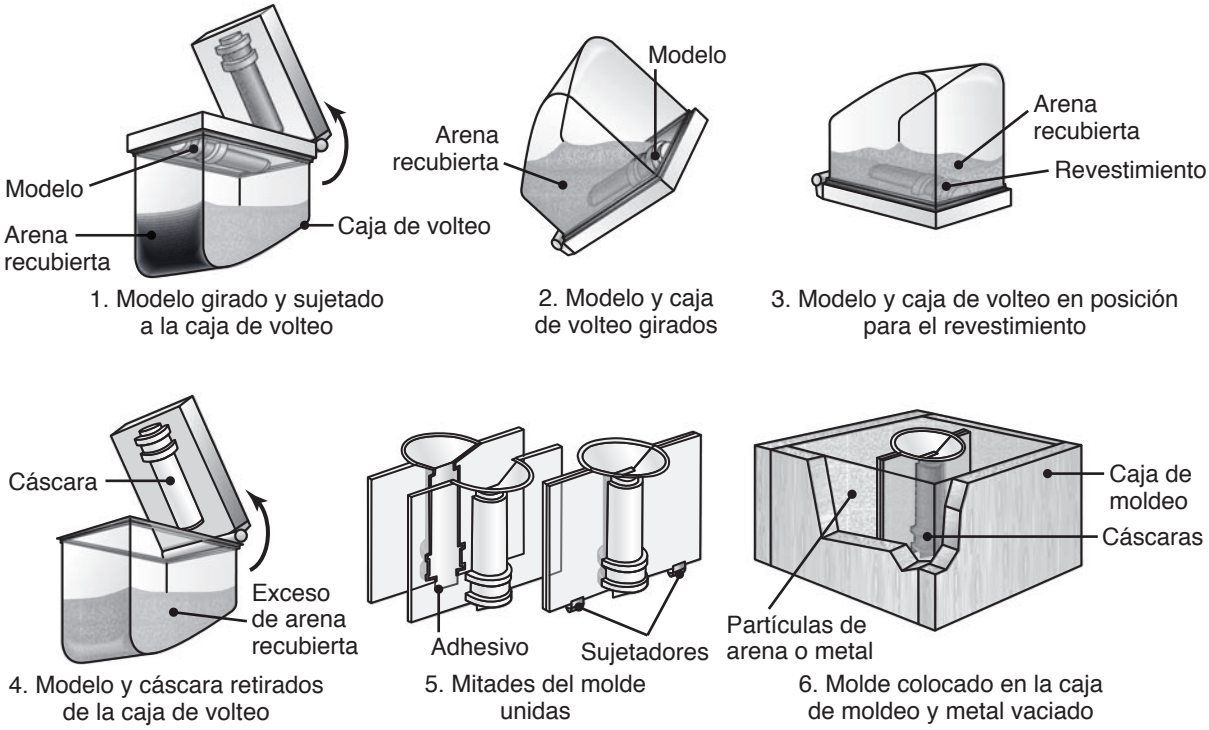


FIGURA 11.10 Proceso de moldeo en cáscara, llamado también técnica de la caja de volteo.

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

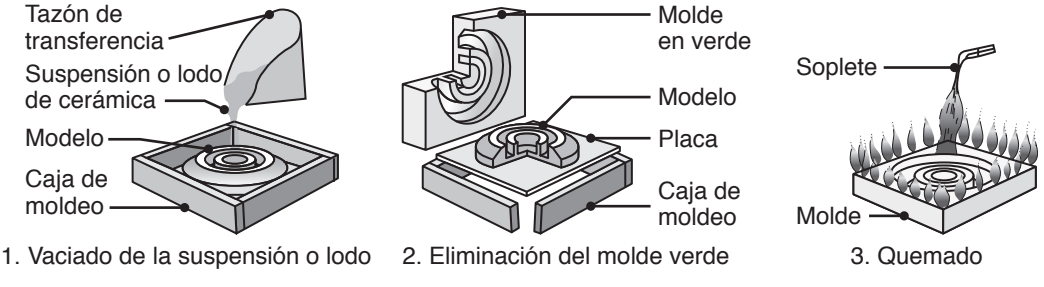


FIGURA 11.11 Secuencia de operaciones en la fabricación de un molde cerámico. *Fuente: Metals Handbook*, Vol. 5, 8a. ed., ASM International, 1970.

de alta temperatura, aceros inoxidables 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 polialquileno 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.

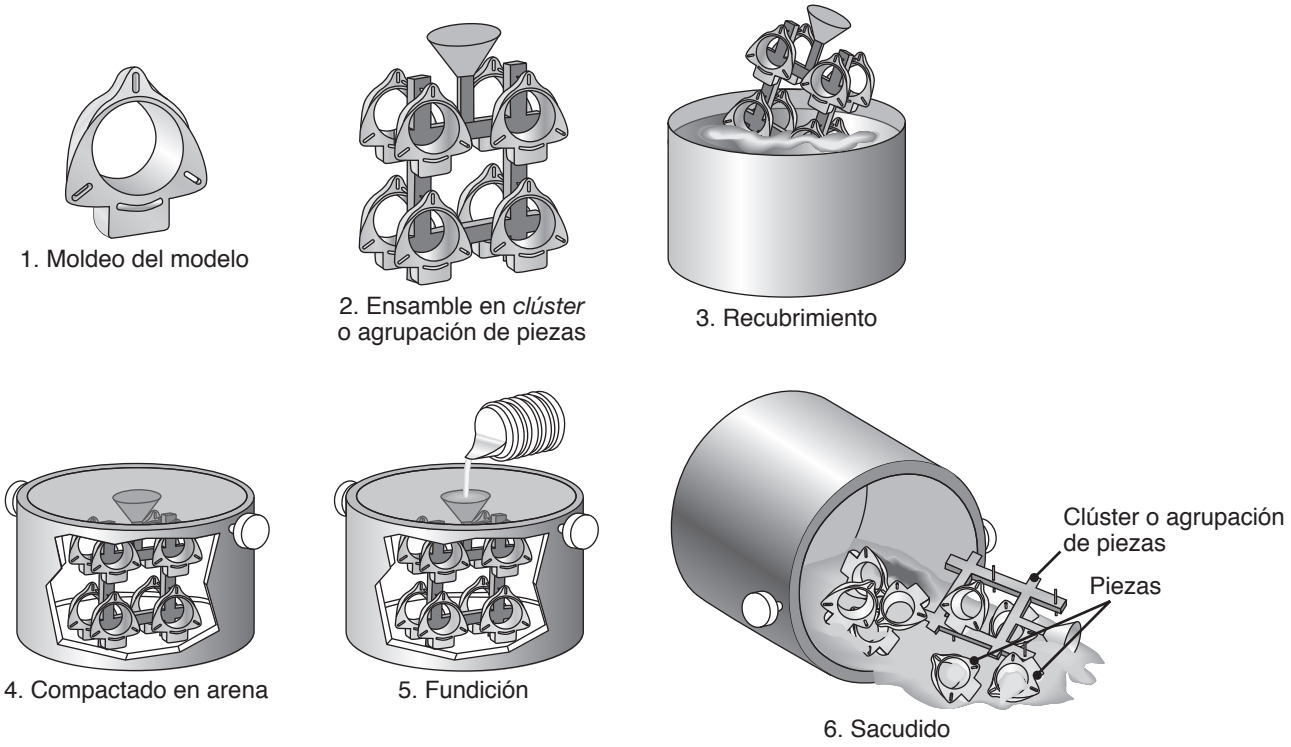


FIGURA 11.12 Ilustración esquemática del proceso de fundición de modelo desechable, también conocido como fundición de espuma perdida (poliestireno expandido) o modelo evaporable.

- 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

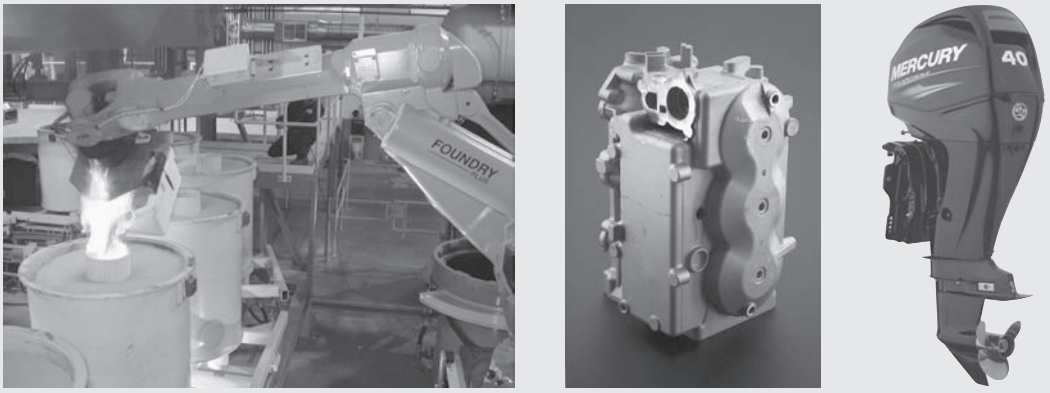
Uno de los componentes más importantes en un motor de combustión interna es el monoblock del motor. Las tendencias de la industria se han concentrado en los diseños de alta calidad, bajo costo y peso ligero. Es posible obtener beneficios económicos a través de la fundición de geometrías más complejas 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 mecánicos 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.

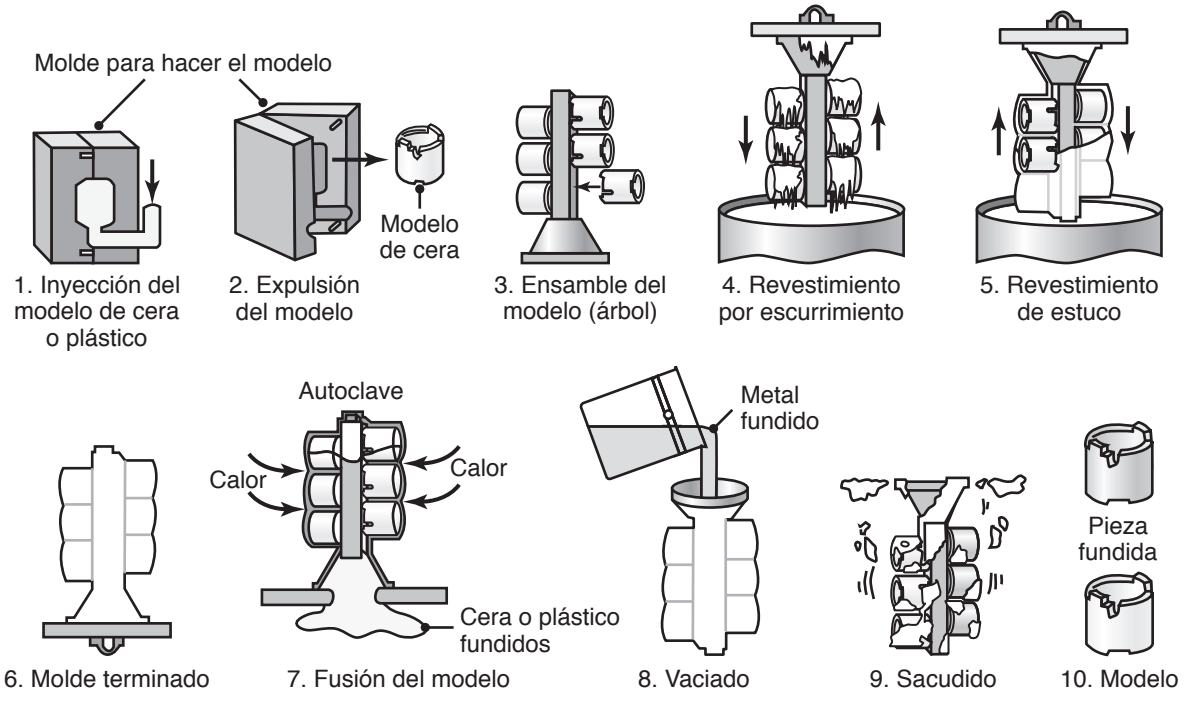


FIGURA 11.14 Ilustración esquemática del proceso de fundición por revestimiento (cera perdida). Las piezas fundidas producidas por este método pueden hacerse con detalles muy finos y usando una variedad de metales. *Fuente:* Cortesía de la Steel Founder's Society of America.

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.

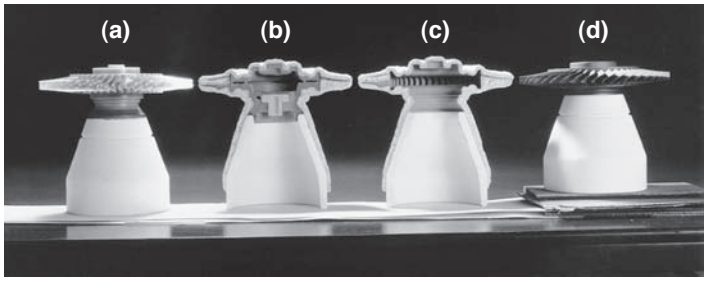


FIGURA 11.15 Fundición por revestimiento de un rotor fundido integralmente para una turbina de gas. (a) Ensamble del modelo de cera. (b) Cascarón cerámico alrededor del modelo de cera. (c) La cera se funde y el molde se llena, al vacío, con una superaleación fundida. (d) Rotor fundido producido en forma 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*)

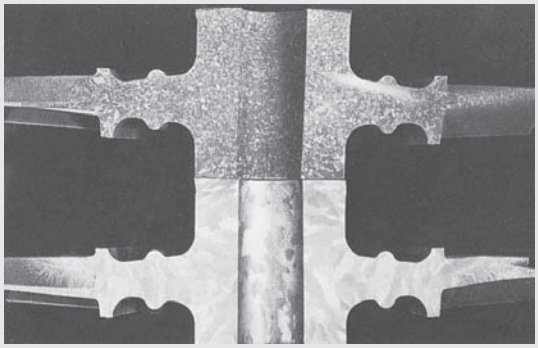


FIGURA 11.16 Sección transversal y microestructura de dos rotores: (arriba) fundido por revestimiento; (abajo) fundido convencionalmente. *Fuente:* Cortesía de ASM International.

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 figura 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.

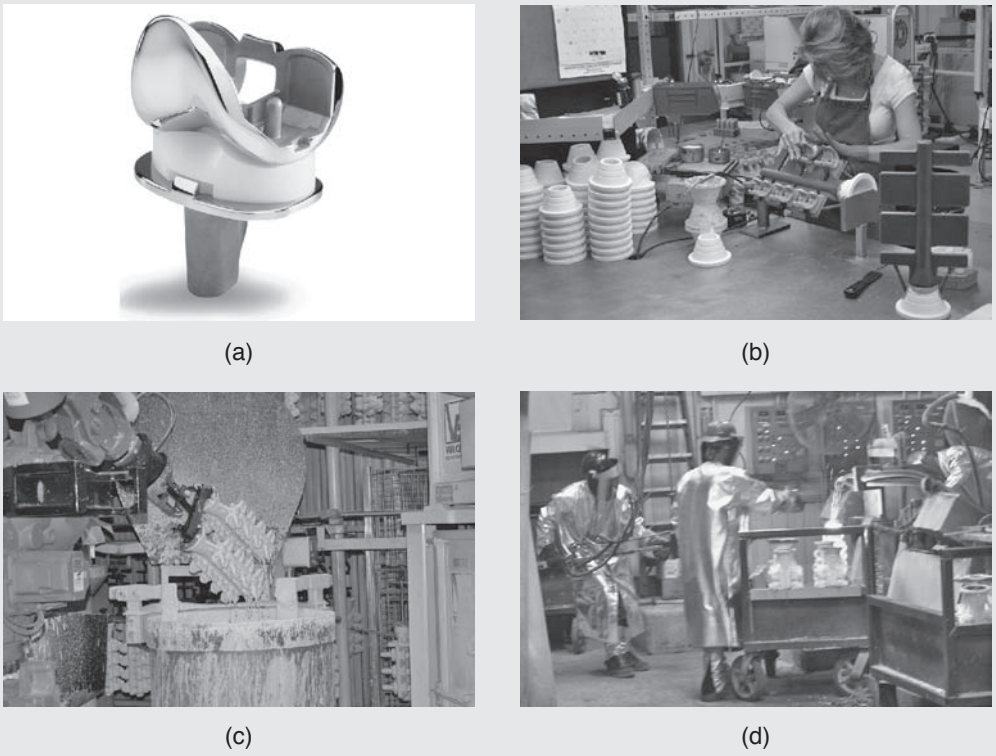


FIGURA 11.17 Manufactura de prótesis totales de rodilla. (a) Soporte de rodilla móvil (MBK, por sus siglas en inglés) NexGen Zimmer; la parte femoral de la prótesis total de rodilla es el objeto de este caso de estudio. (b) Ensamble de los modelos en un árbol central. (c) Inmersión del árbol en una suspensión para desarrollar un molde a partir del revestimiento. (d) Vaciado del metal en un molde. *Fuente:* Cortesía de M. Hawkins, Zimmer, Inc.

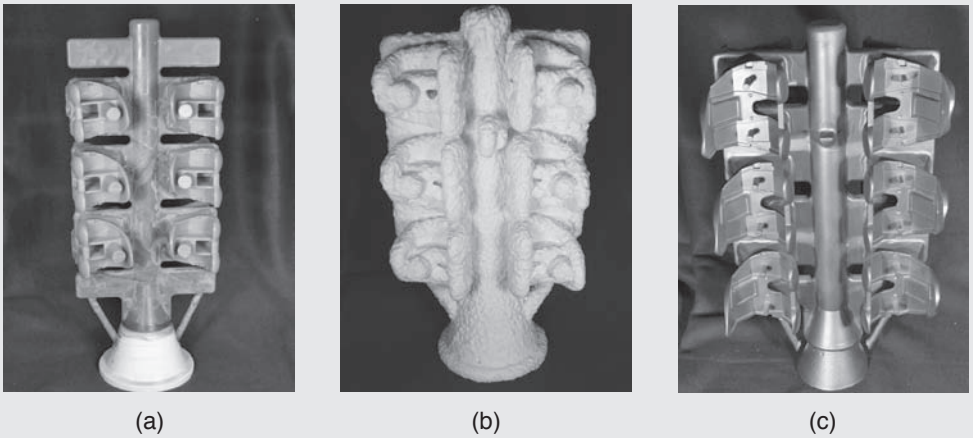


FIGURA 11.18 Progresión del árbol. (a) Después del ensamble de los modelos en el árbol; (b) después del revestimiento; (c) después de retirar el molde. *Fuente:* Cortesía de M. Hawkins, Zimmer, Inc.

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

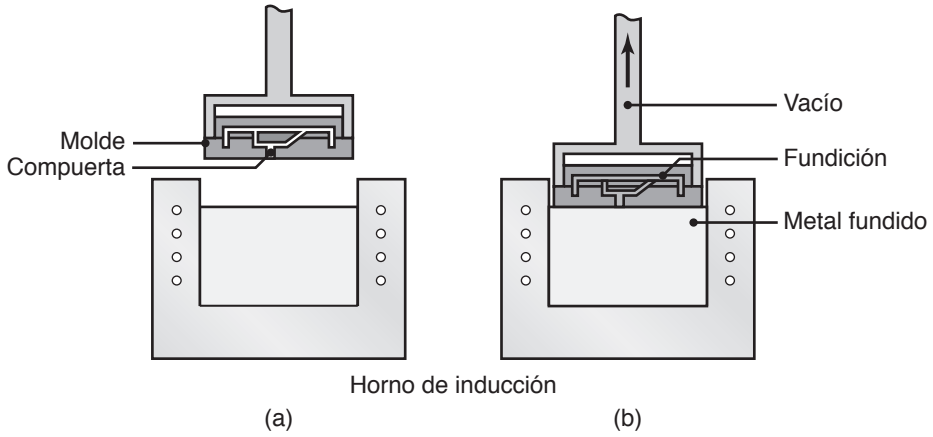


FIGURA 11.19 Ilustración esquemática del proceso de fundición al vacío; observe que el molde tiene una compuerta inferior. (a) Antes y (b) después de la inmersión del molde en el metal fundido. *Fuente:* Según R. Blackburn.

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 liquidus 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.

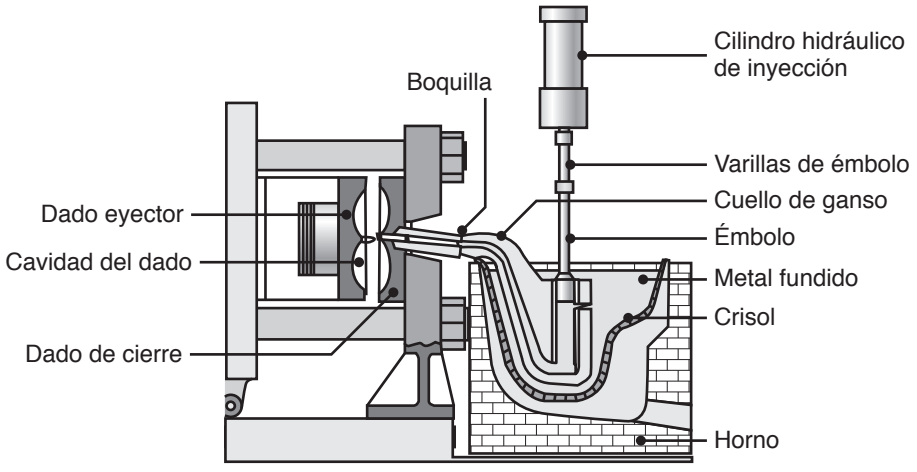


FIGURA 11.20 Representación esquemática del proceso de fundición en dado en cámara caliente.

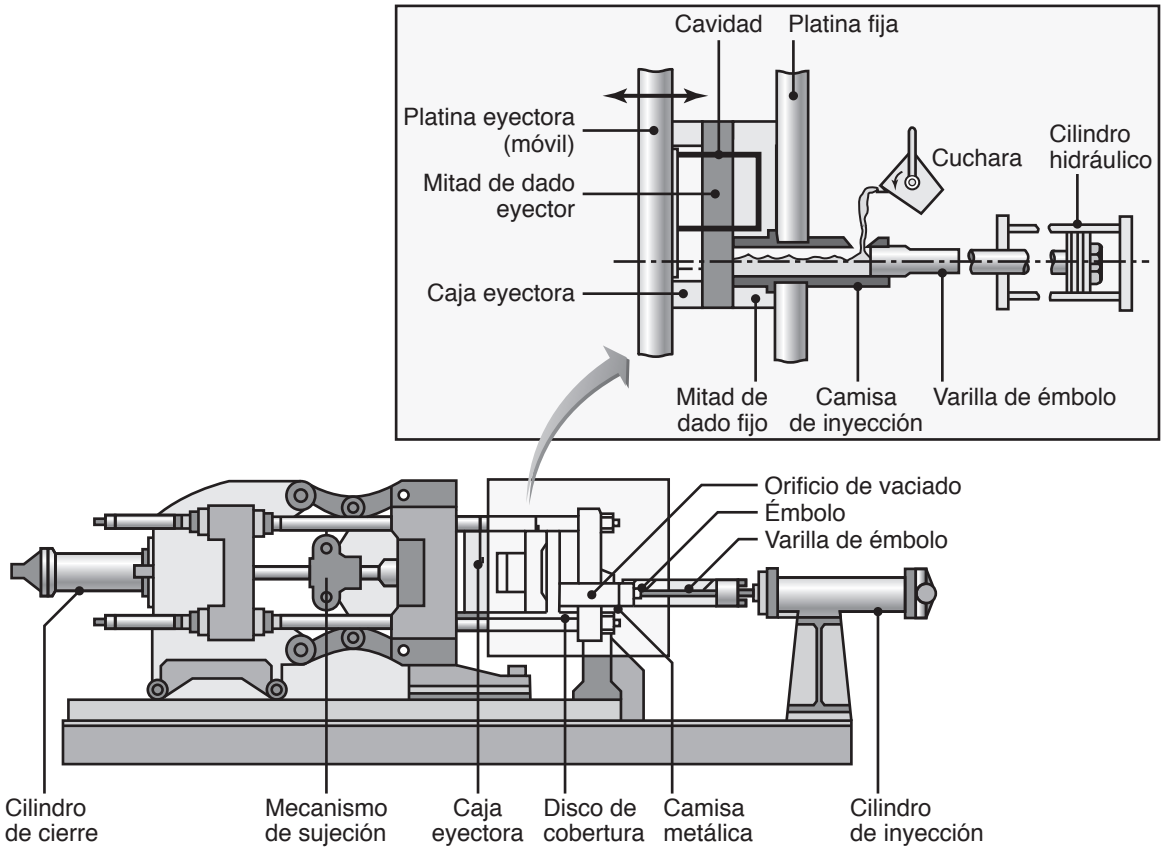


FIGURA 11.21 Ilustración esquemática del proceso de fundición en dado en cámara fría. Estas máquinas son grandes en comparación con el tamaño de la fundición debido a las grandes fuerzas requeridas para mantener las dos mitades de los moldes cerradas bajo presión durante la colada.

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.

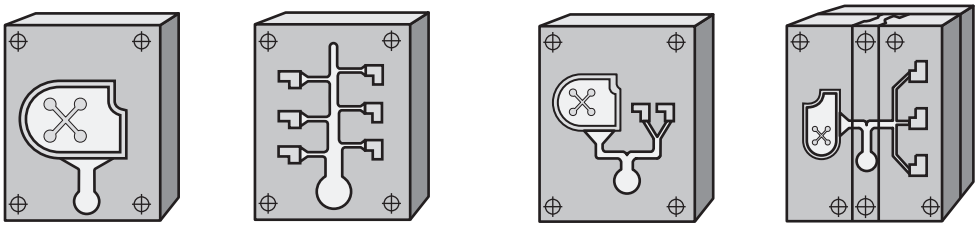
Fuente: Datos proporcionados por: American Die Casting Association, Wheeling, Illinois.

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 23.1l), 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 25 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.



(a) Dado con una sola cavidad (b) Dado con cavidades múltiples (c) Dado de combinación de cavidades (d) Dado unitario

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 espaciamiento 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.

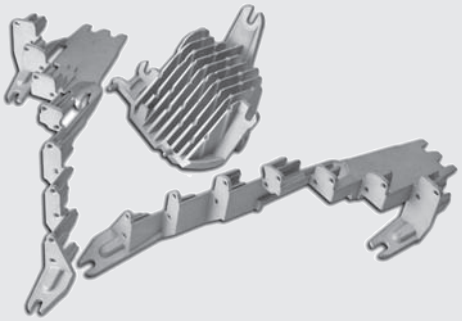


FIGURA 11.23 Montajes de una luz de circulación diurna y una señal direccional fundidos en dado y producidos usando aluminio para fundición a presión. *Fuente:* Cortesía de la American Foundry Society.

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

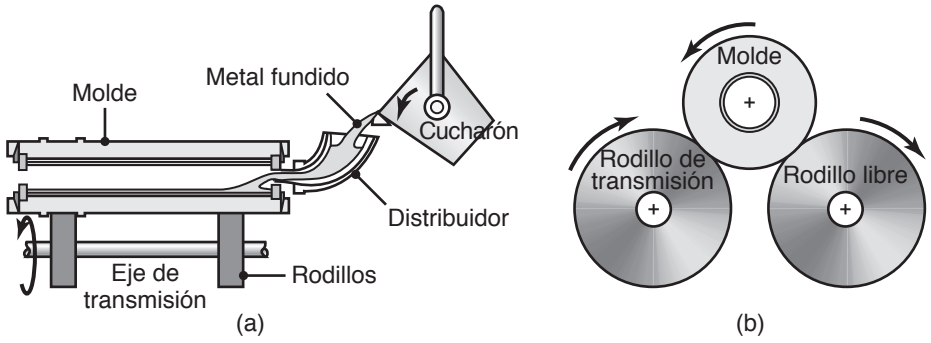


FIGURA 11.24 (a) Ilustración esquemática del proceso de fundición centrífuga; con este proceso pueden fundirse tubos, camisas de pistón y piezas con formas semejantes. (b) Vista lateral de la máquina.

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

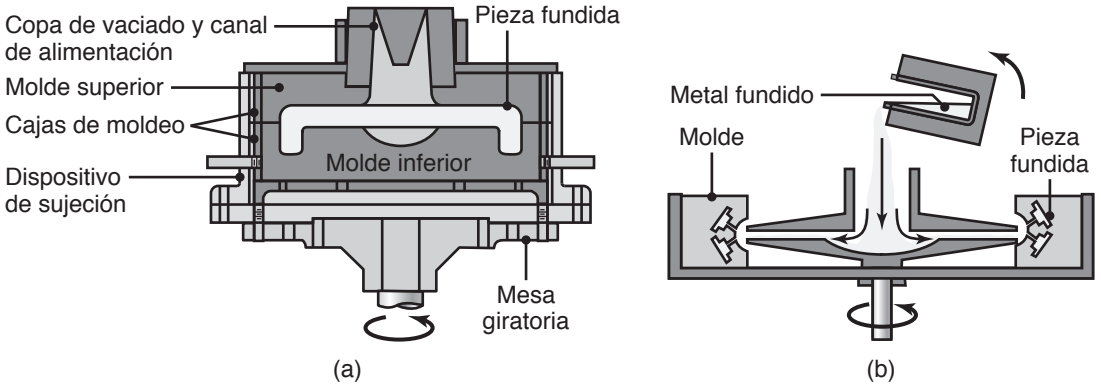


FIGURA 11.25 (a) Ilustración esquemática del proceso de fundición semicentrífuga; mediante este proceso, pueden fundirse ruedas con rayos. (b) Ilustración esquemática de la fundición por centrifugado; los moldes se colocan en la periferia de la máquina y el metal fundido es forzado a entrar a los moldes por la fuerza centrífuga.

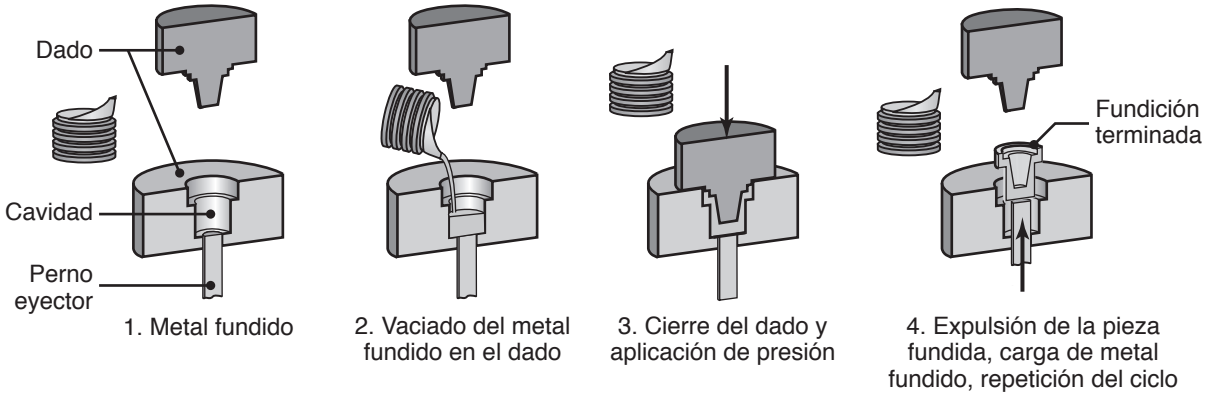


FIGURA 11.26 Secuencia de operaciones en el proceso de fundición por dado impresor; este proceso combina las ventajas de la fundición y el forjado.

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 **tixoformado** 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 tixoformado 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 compósito

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

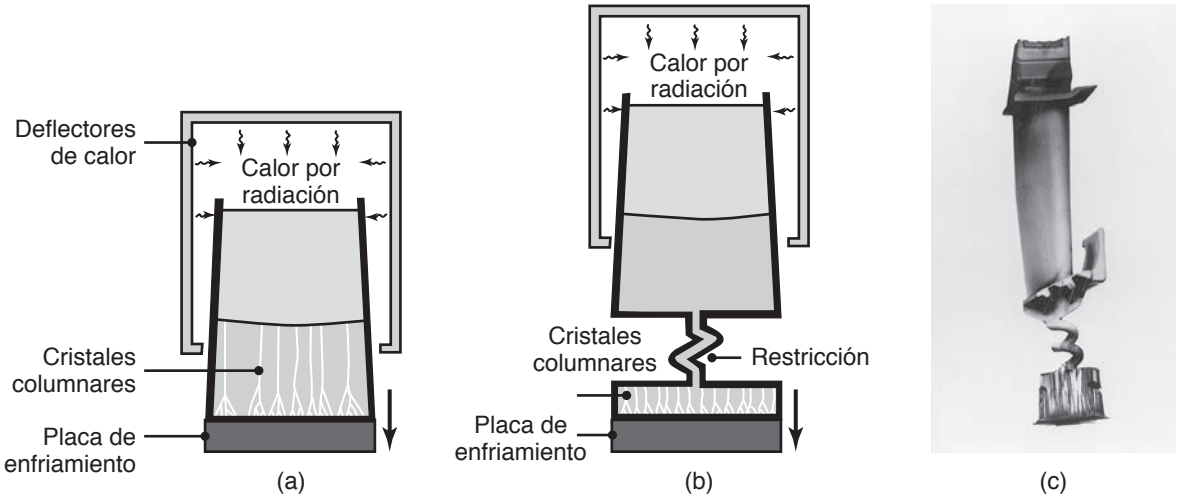


FIGURA 11.27 Métodos de fundición de álabes para turbina: (a) solidificación direccional; (b) método para producir un álabe monocristalino y (c) álabe monocristalino con la porción de restricción aún adherida (vea también la figura 1.1). *Fuente:* (a) y (b) Según B. H. Kear, (c) cortesía de ASM International.

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 álabe se solidifica direccionalmente con los límites de grano longitudinales, pero no transversales. Así, el álabe 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 desciende 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

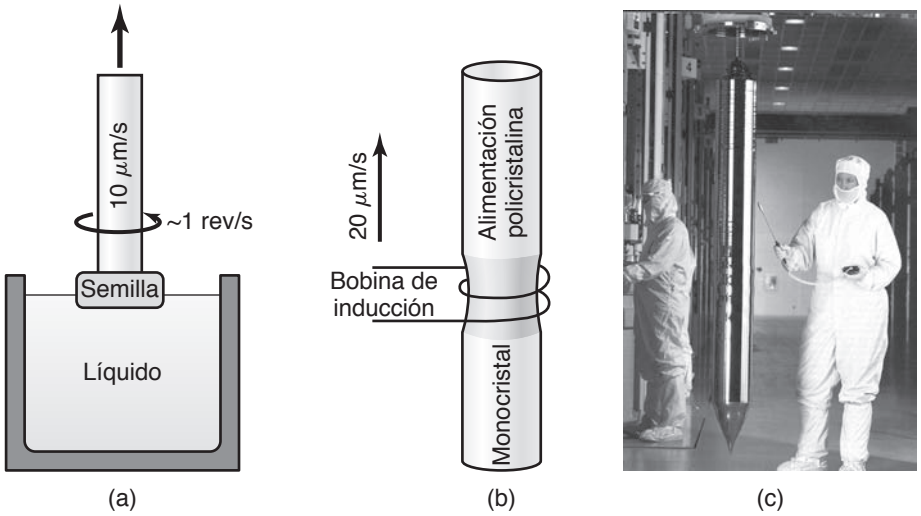


FIGURA 11.28 Dos métodos de crecimiento cristalino: (a) extracción de cristal (proceso de Czochralski) y (b) método de zona flotante. El crecimiento de cristales resulta especialmente importante en la industria de los semiconductores. (c) Lingote monocristalino producido mediante el proceso de Czochralski. *Fuente:* Cortesía de Intel Corporation.

se extrae de manera lenta (a una velocidad de aproximadamente 10 μm/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**).

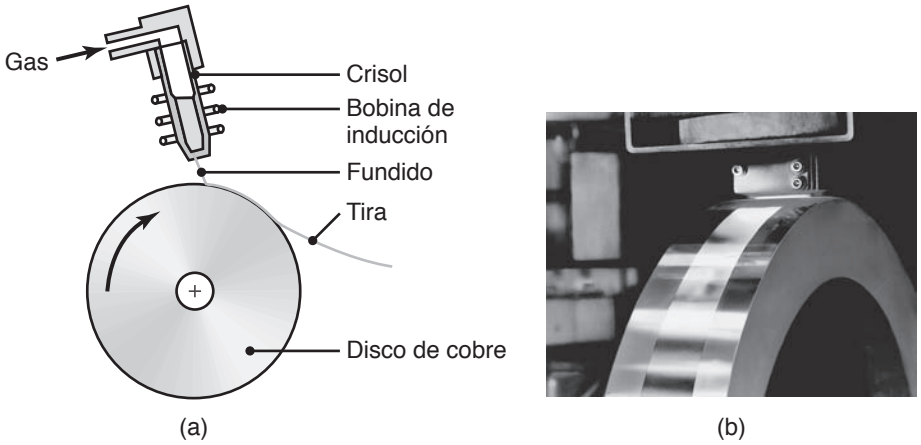


FIGURA 11.29 (a) Ilustración esquemática del enfriamiento por disco rotatorio para producir tiras delgadas de metal amorfo. (b) Fotografía de la producción de una aleación de níquel mediante enfriamiento por disco rotatorio. *Fuente:* Cortesía de Siemens AG.

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.

2. 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).
3. 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.
4. 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.
5. 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.

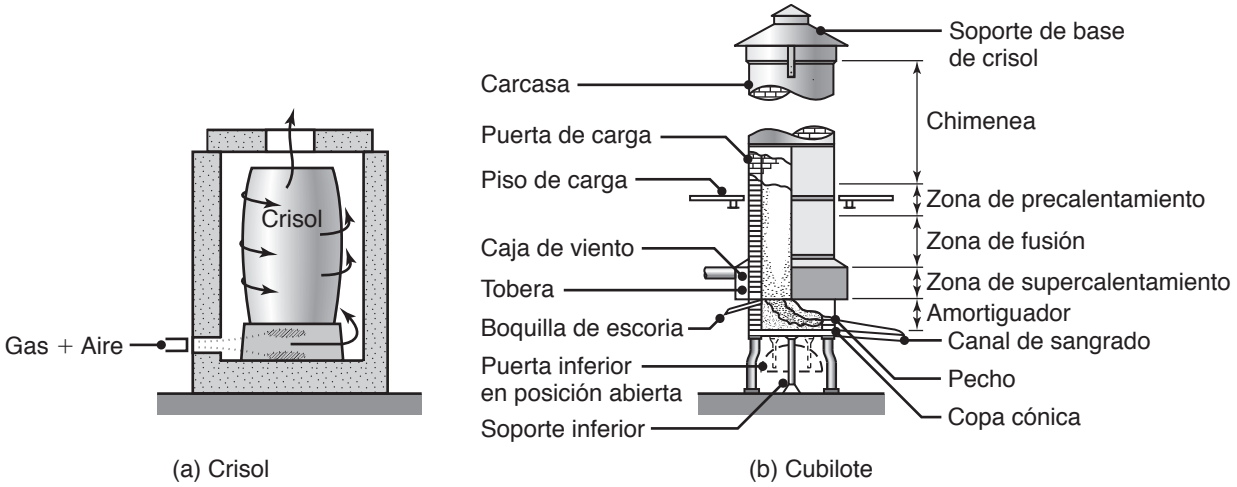


FIGURA 11.30 Dos tipos de hornos de fusión utilizados en las fundidoras.

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
Aglutinantes
Arena para moldeo en verde
Corazones
Crecimiento de cristales
Formado de metal semisólido
Fundentes
Fundición a la cera perdida
Fundición a presión
Fundición al vacío
Fundición centrífuga
Fundición de modelo desechable
Fundición de modelo evaporable
Fundición de precisión
Fundición en arena
Fundición en dado (o inyección de metales)
Fundición en molde cerámico
Fundición en molde de cáscara
Fundición en molde de yeso
Fundición en molde permanente
Fundición hueca por escurrimiento
Fundición por dado impresor
Fundición por revestimiento
Fundidora
Fusión por levitación
Modelos
Molde compósito
Molde desechable
Molde permanente
Moldeo con grafito apisonado
Moldeo por inserto
Plantillas de corazón
Proceso de espuma perdida o modelo consumible
Prototipado rápido
Reofundición
Solidificación rápida
Soportes
Tixotropía

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 las 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 100 g 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?

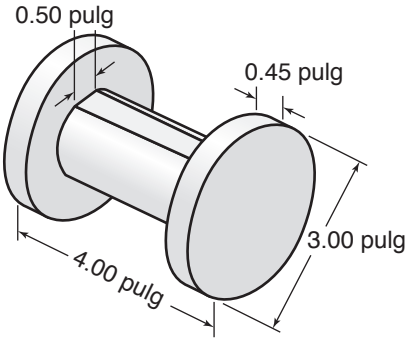
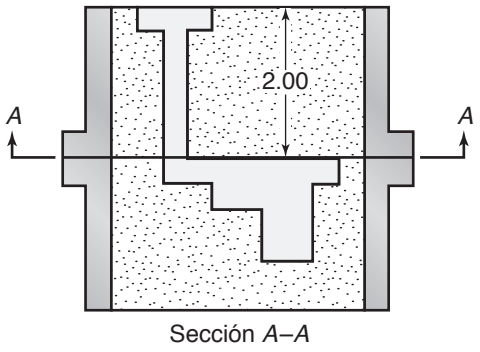


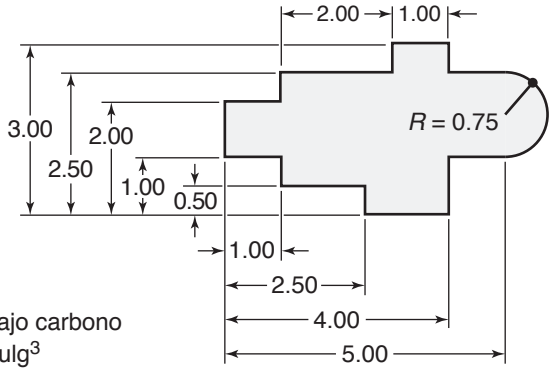
FIGURA P11.45

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.



Sección *A–A*



Material: Acero al bajo carbono
Densidad: 0.26 lb/pulg^3
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.

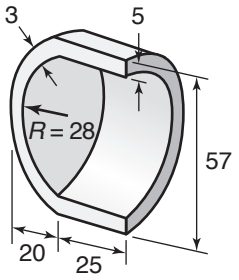
11.56 Escriba un documento breve sobre la permeabilidad de los moldes y las técnicas que se utilizan para determinarla.

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.

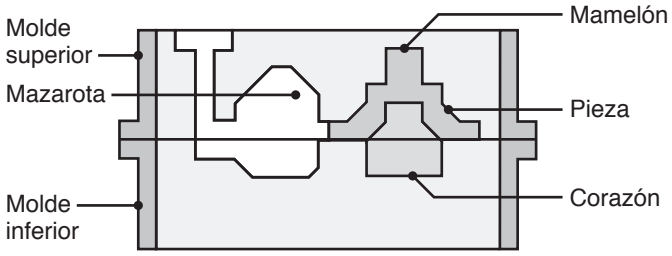


FIGURA P11.60

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?

CAPÍTULO

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).

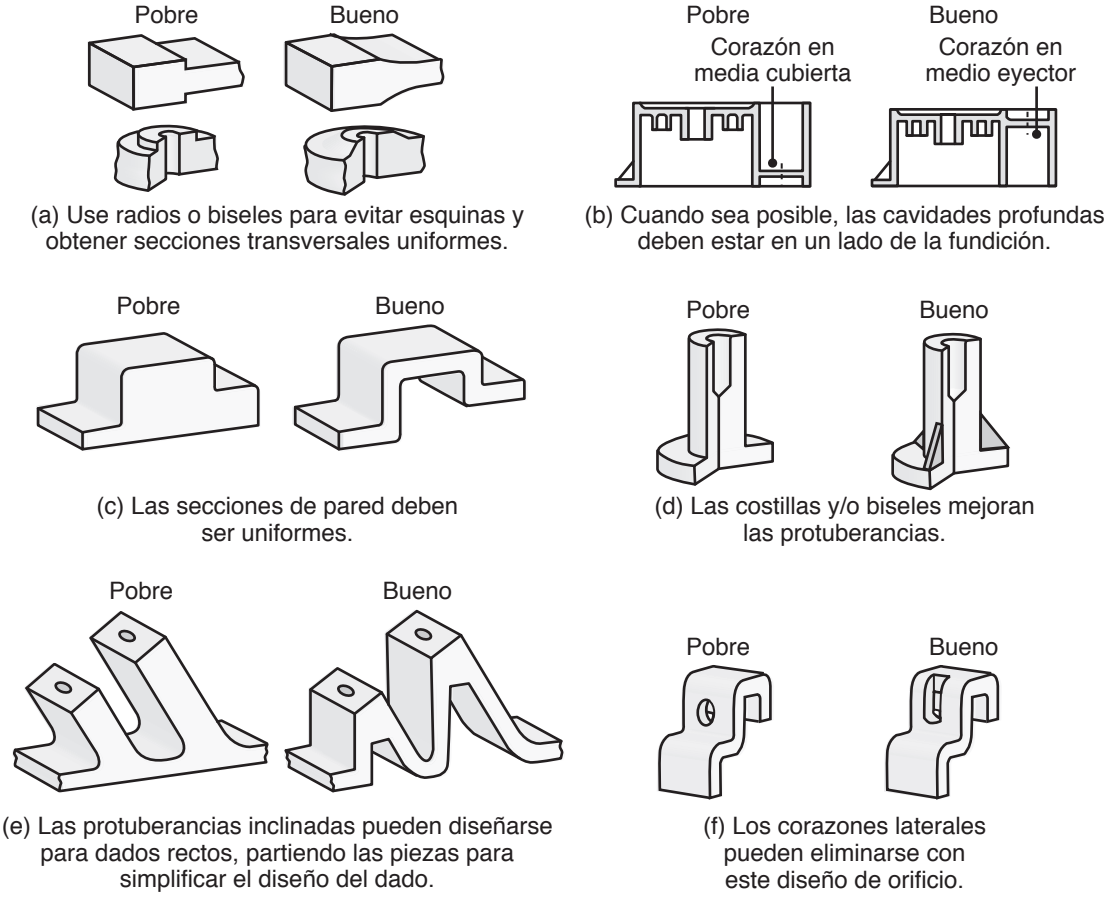


FIGURA 12.1 Modificaciones de diseño sugeridas para evitar defectos en las piezas fundidas. *Fuente:* Imágenes proporcionadas por: North American Die Casting Association, Wheeling, Illinois.

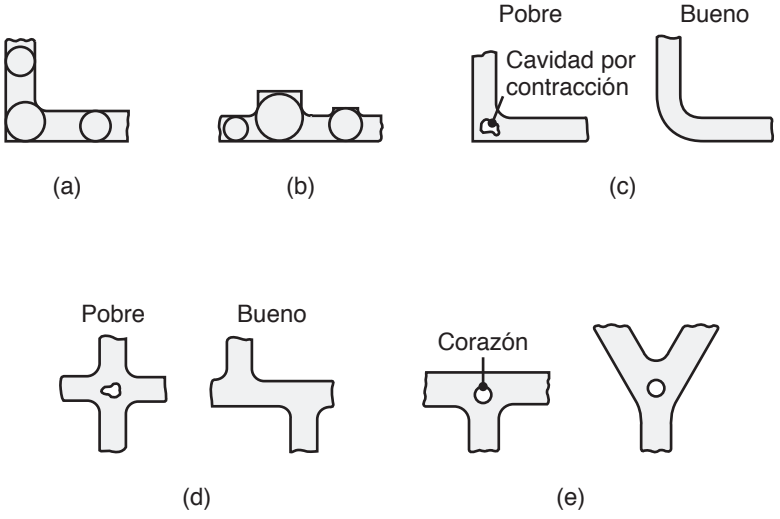
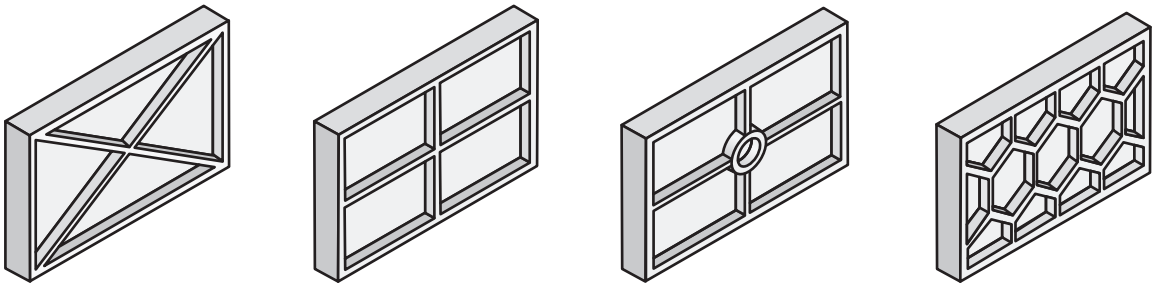


FIGURA 12.2 Ejemplos de diseños que muestran la importancia de mantener secciones transversales uniformes en las fundiciones para evitar puntos calientes y cavidades por contracción.

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-



(a) Pobre (b) Pobre (c) Bueno (d) El mejor

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 deformarse 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

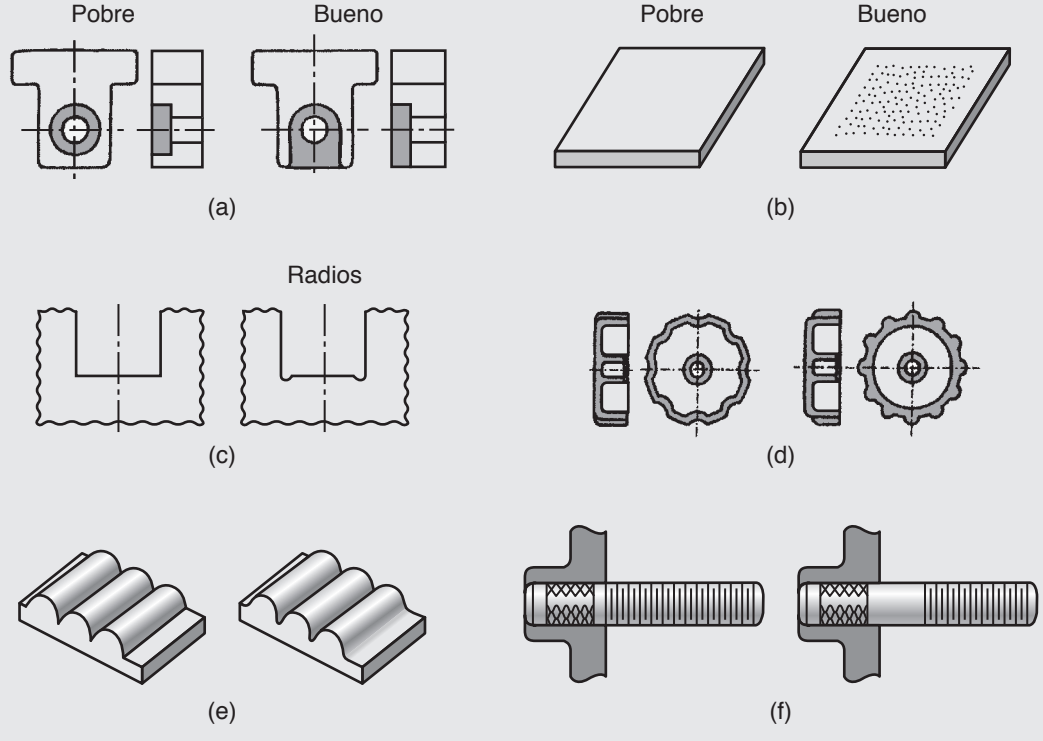


FIGURA 12.4 Ejemplos de diseños de fundición indeseables (pobres) y deseables (buenos). *Fuente:* Imágenes proporcionadas por: North American Die Casting Association, Wheeling Illinois.

(*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 agudas (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 isotermas (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, bronces al aluminio, bronces fosforados y bronces 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.

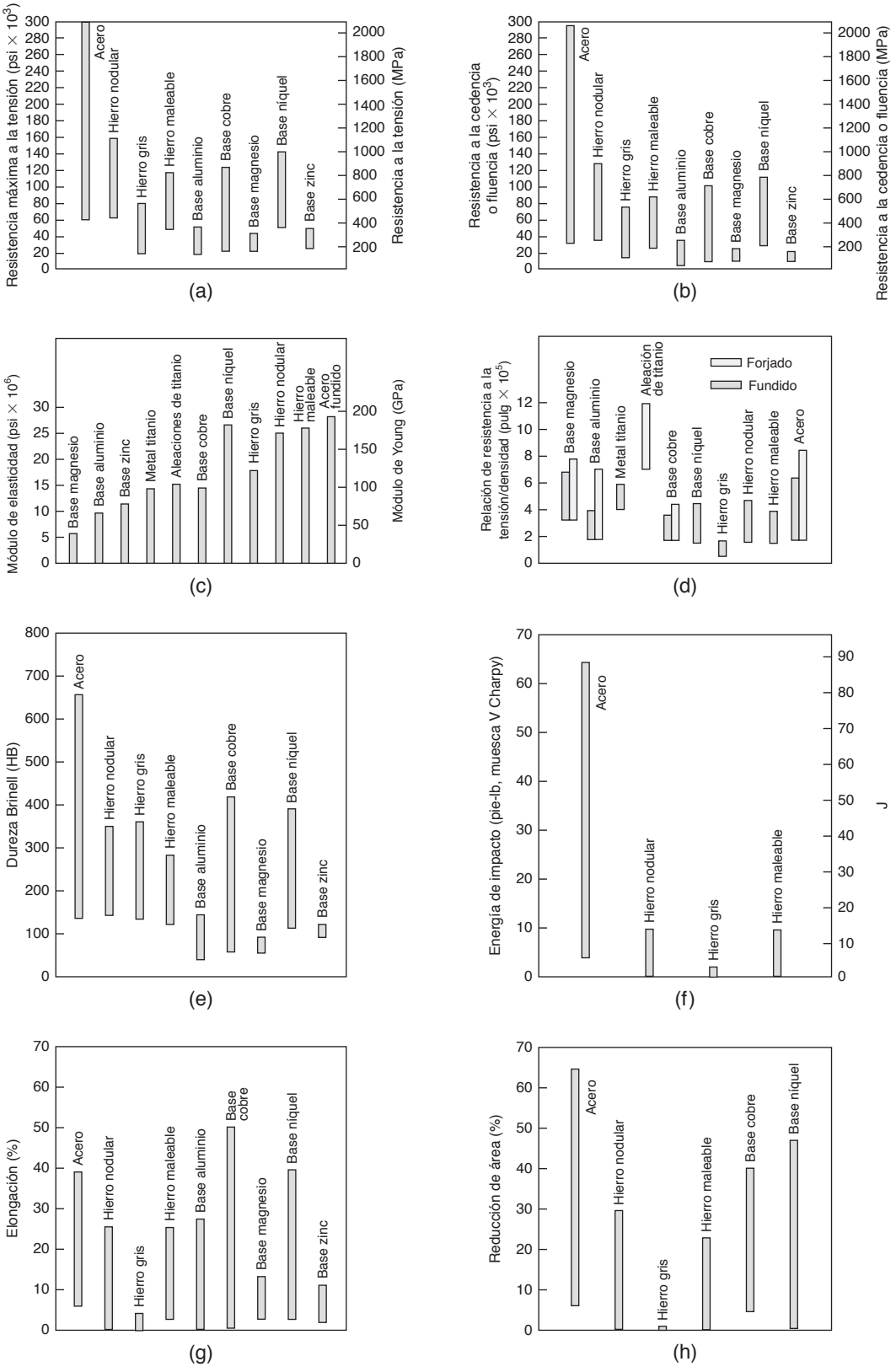


FIGURA 12.5 Propiedades mecánicas para diferentes grupos de aleaciones de fundición; observe que incluso dentro del mismo grupo, las propiedades varían en un amplio intervalo, en particular para los aceros fundidos. *Fuente:* Cortesía de la Steel Founder's Society of America.

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	Carcaza 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
Cavidades por contracción
Costo unitario
Hierro de grafito compactado
Hierro fundido
Línea de partición
Porosidad
Principios de diseño
Puntos calientes
Rebabas
Tolerancias de contracción del fabricante de modelos
Tolerancias en el maquinado

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?
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?

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?
12.20 Explique las ventajas y limitaciones de los biseles 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?

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.

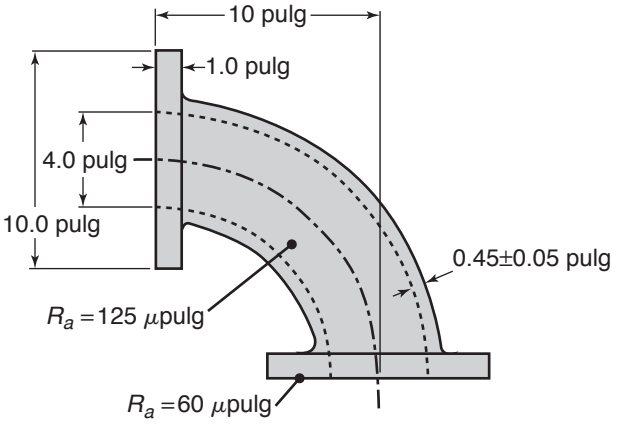


FIGURA P12.28

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.

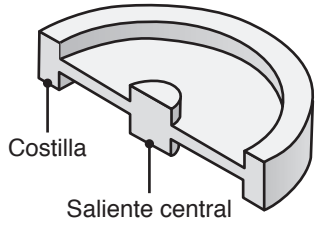


FIGURA P12.35

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?

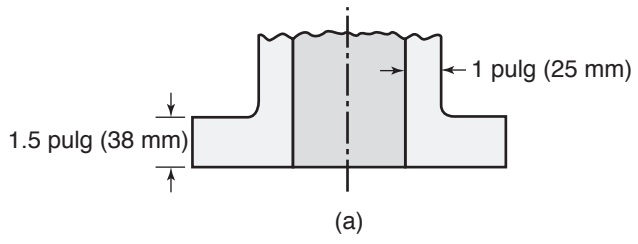


FIGURA P12.37

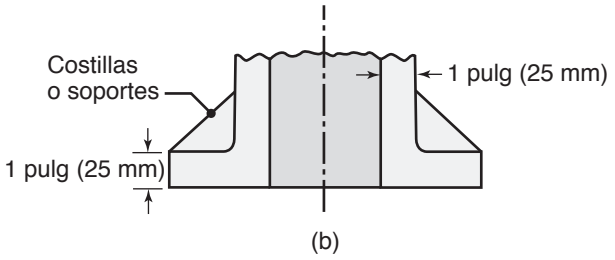


FIGURA P12.37 (*continuación*)

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.

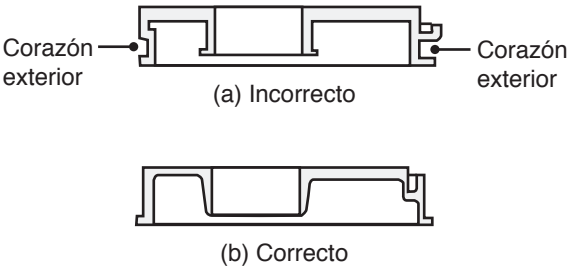


FIGURA P12.38

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

PARTE III

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-

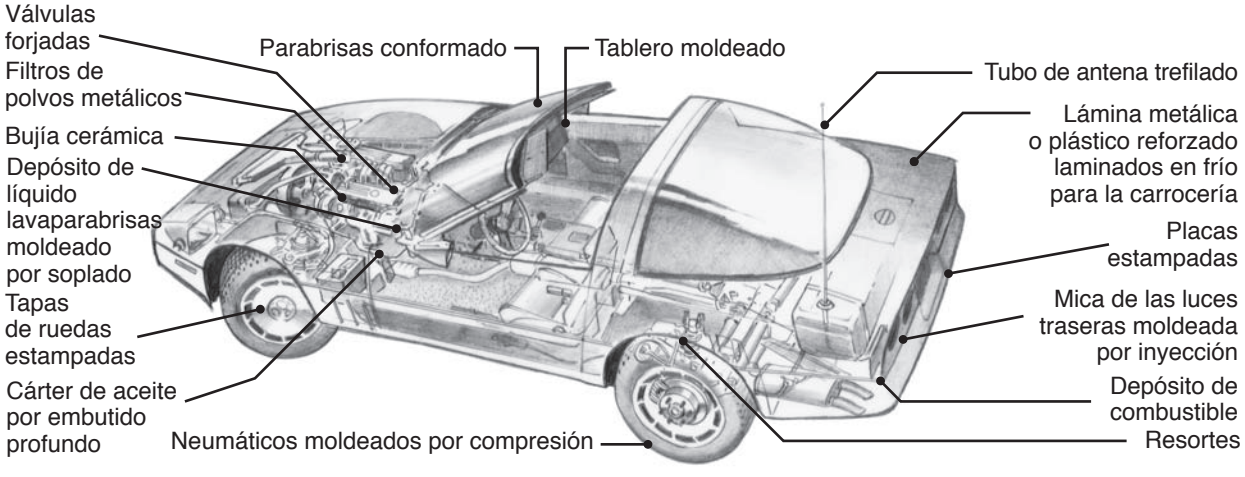


FIGURA III.1 Piezas formadas y conformadas de un automóvil típico.

rrocería 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.

CAPÍTULO

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,

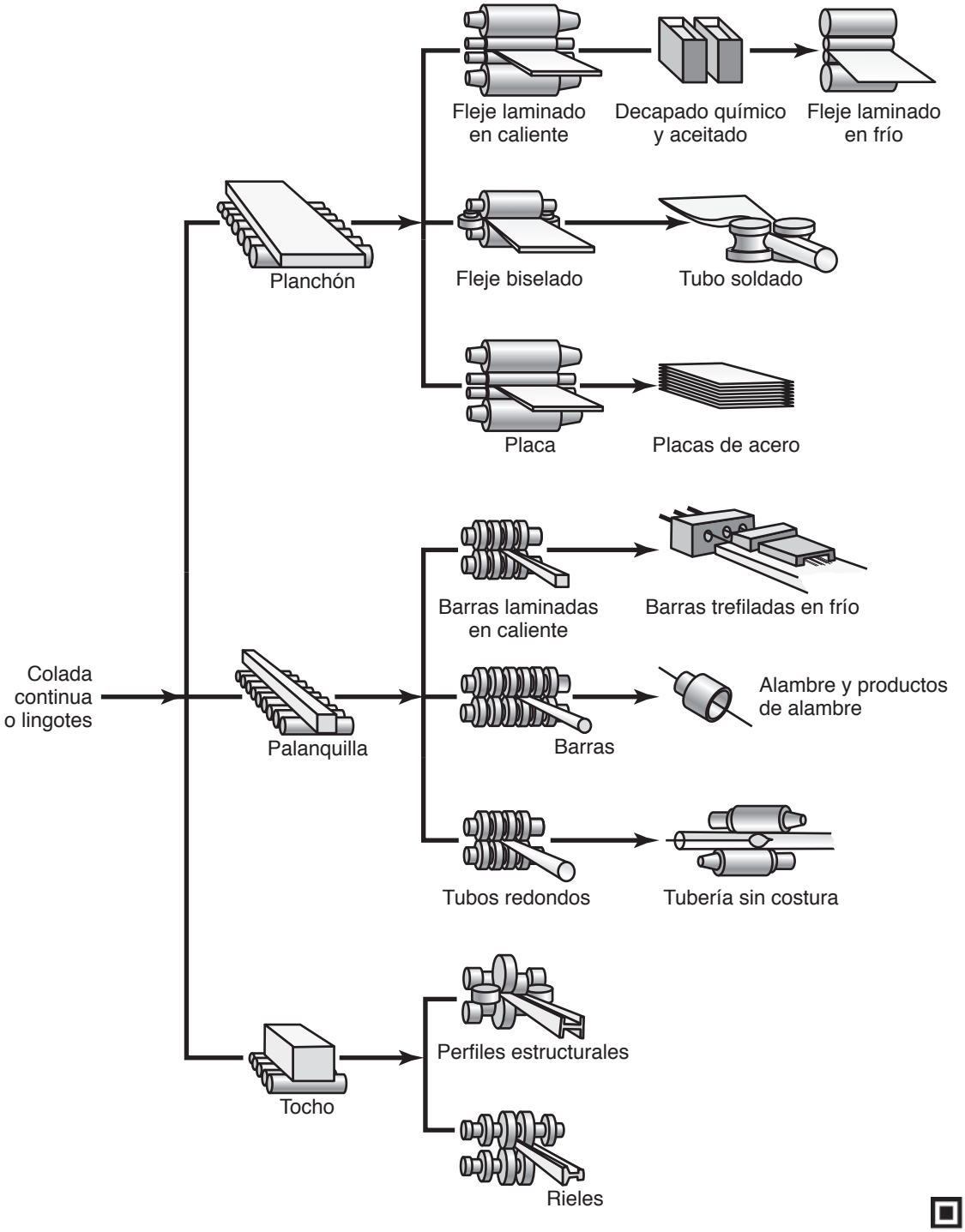


FIGURA 13.1 Esquema de los distintos procesos de laminación plana y laminación de forma. *Fuente:* Cortesía del American Iron and Steel Institute.

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.

Código QR 13.1 Animación de la laminación en caliente de palanquillas. (*Fuente:* Cortesía de Sandvik Coromant).

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.

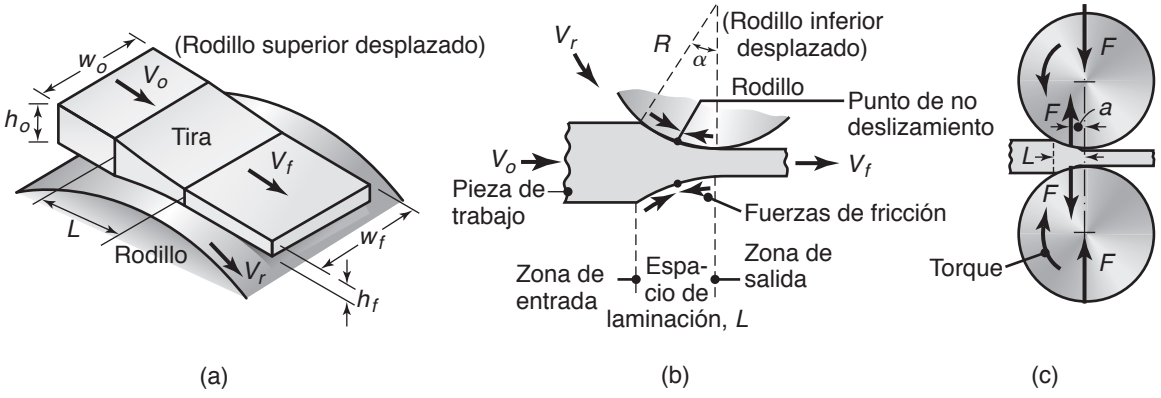


FIGURA 13.2 (a) Ilustración esquemática del proceso de laminación plana. (b) Fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies de la tira. (c) Fuerza de laminación, F, y torque, T, actuando sobre los rodillos. El ancho de la tira, w, por lo general se incrementa durante la laminación, como se muestra 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

$$\text{Deslizamiento hacia adelante} = \frac{V_f - V_r}{V_r}, \tag{13.1}$$

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:

$$h_o - h_f = \mu^2 R. \tag{13.2}$$

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

$$F = Lw Y_{\text{prom}}, \tag{13.3}$$

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

$$\text{Potencia (kW)} = \frac{2\pi FLN}{60\,000}, \tag{13.4}$$

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 deformación 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

$$F = LwY_{prom} = (1.55)(9)(26\,000)$$
$$= 363\,000 \text{ lb} = 1.6 \text{ MN}$$

La potencia total se calcula a partir de la ecuación (13.5), con N = 100 rpm. Así,

$$\text{Potencia} = \frac{2\pi FLN}{33\,000} = \frac{2\pi(363\,000)(1.55/12)(100)}{33\,000}$$
$$= 898 \text{ hp} = 670 \text{ kW}$$

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.

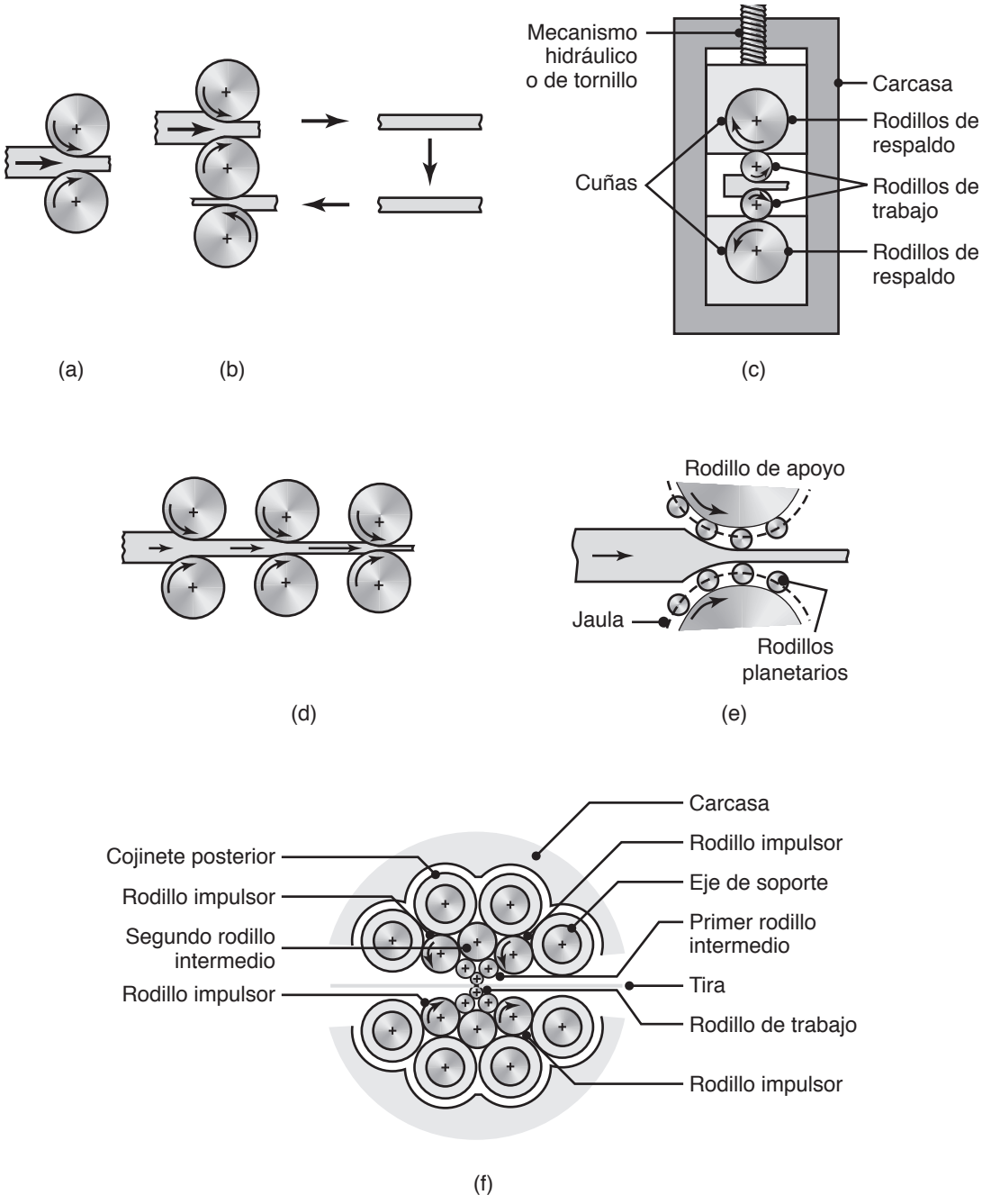


FIGURA 13.3 Ilustración esquemática de distintos arreglos de rodillos: (a) Molino de dos rodillos; si se usa un molino de dos rodillos para piezas gruesas pero cortas, comúnmente laminará una palanquilla de ida y vuelta en varias pasadas, lo que se conoce como un *molino reversible*. (b) Molino de tres 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).

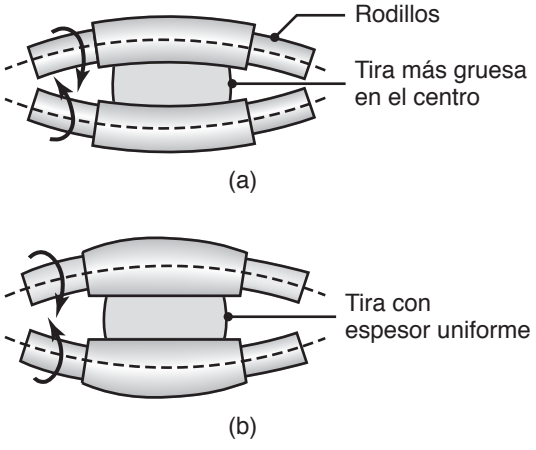


FIGURA 13.4 (a) Flexión de rodillos cilíndricos rectos causada por las fuerzas de rodillo. (b) Flexión de rodillos rectificados con combadura, lo que produce una tira con espesor uniforme en toda su anchura. (Las deflexiones del rodillo se han exagerado para mayor claridad).

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-

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.

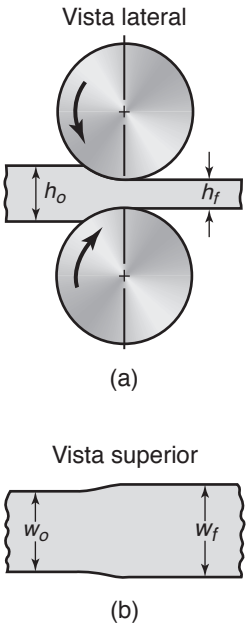


FIGURA 13.5 Ensanchado en la laminación plana; note que es posible observar un ensanchado semejante cuando se aplana masa con un rodillo.

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 **alambrón**, 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-*

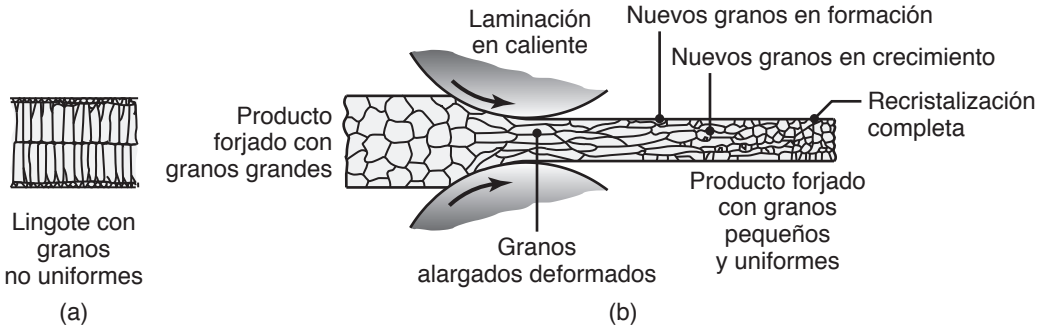


FIGURA 13.6 Cambios durante la laminación en caliente en la estructura granular de metales fundidos o forjados que contienen grano grueso. La laminación en caliente es una manera efectiva de reducir el tamaño de grano de los metales para mejorar su resistencia y ductilidad; las estructuras de colada 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 estirarla 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.

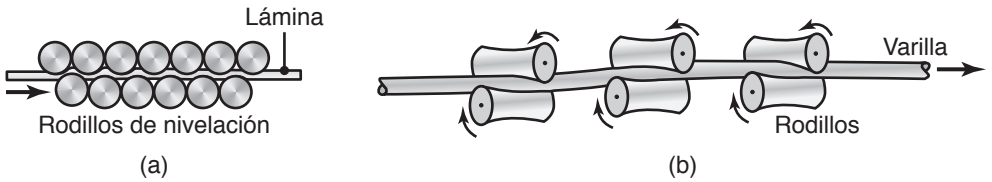


FIGURA 13.7 (a) Método de nivelación con rodillos para enderezar hojas laminadas. (b) Nivelación con rodillos para enderezar varillas trefiladas.

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 doblez 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).

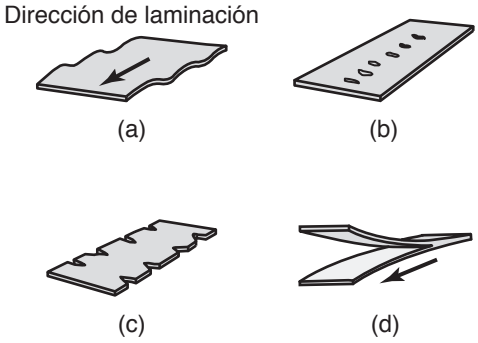


FIGURA 13.8 Ilustración esquemática de los defectos típicos en la laminación plana: (a) bordes ondulados; (b) grietas con forma de cierre en el centro de la tira; (c) grietas en el borde y (d) lagartismo.

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.

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

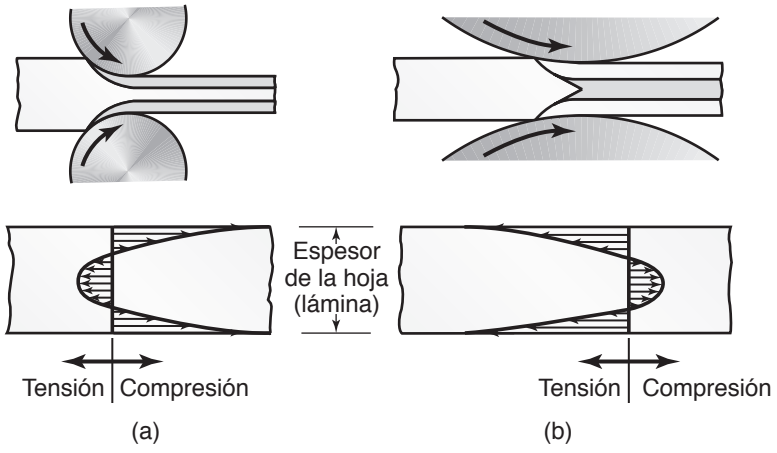


FIGURA 13.9 (a) Esfuerzos residuales desarrollados en la laminación con rodillos de diámetro pequeño o con pequeñas reducciones en el espesor por pasada. (b) Esfuerzos residuales desarrollados en la laminación con rodillos de diámetro grande o con grandes reducciones por pasada; observe que los patrones 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 (±3/16 pulg/pie) para la laminación en frío y ±55 mm/m (±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).

FIGURA 13.10 Vista de un molino de laminación. *Fuente:* Cortesía de Ispat Inland.

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

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

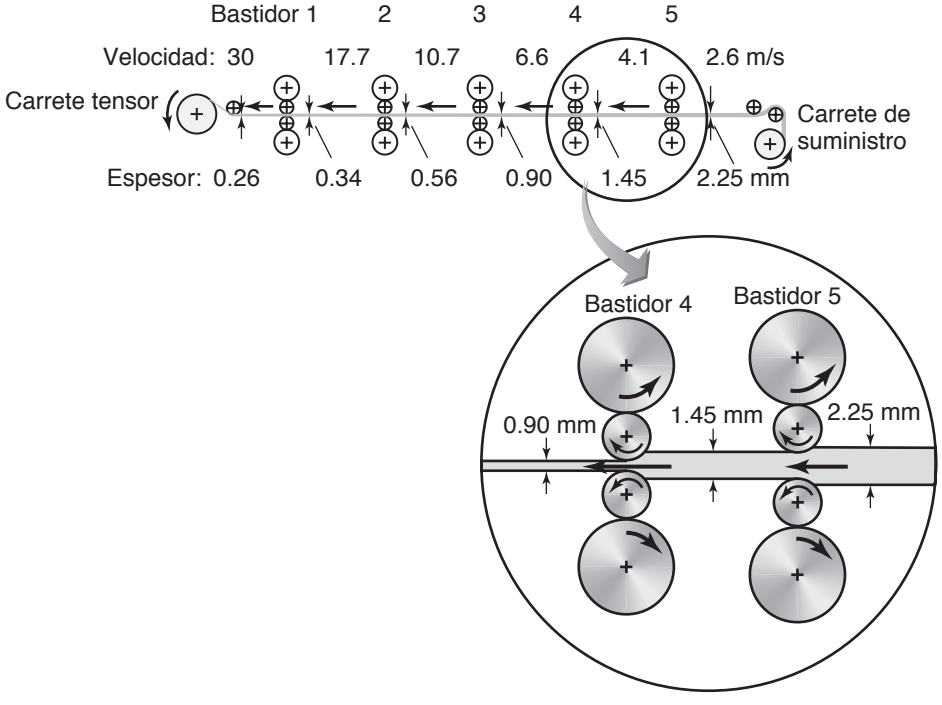


FIGURA 13.11 Ejemplo de una operación de laminación en tándem.

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 cuela 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.

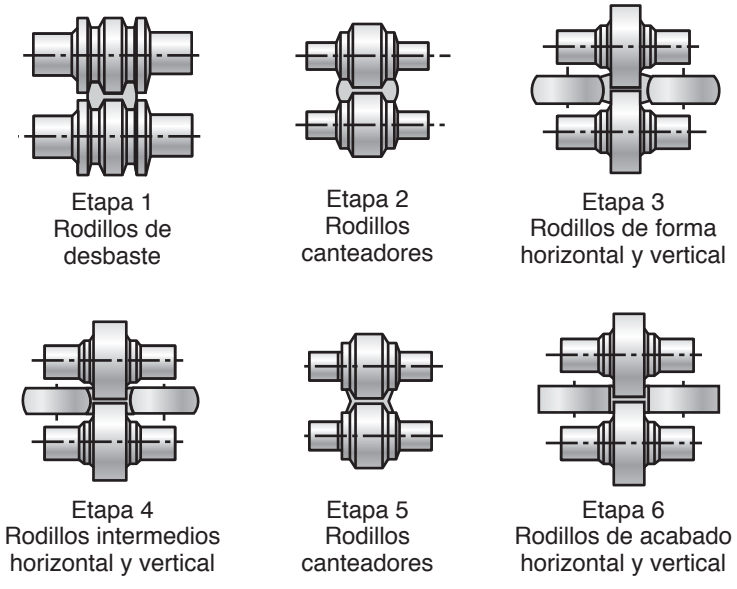


FIGURA 13.12 Pasos en la laminación de forma de una viga I. Existen diversas secciones estructurales, como canales y rieles, que también se laminan mediante este proceso.

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).

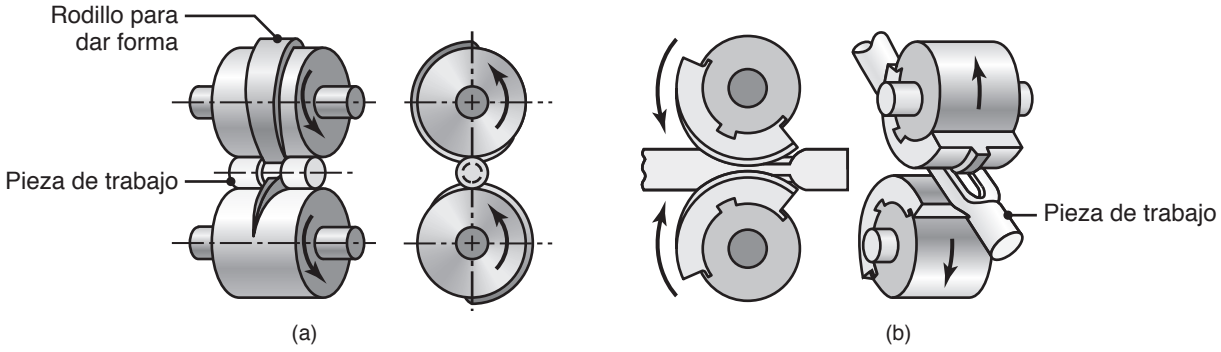


FIGURA 13.13 Dos ejemplos de la operación de forjado con rodillos, también conocida como laminación cruzada; mediante este proceso es posible fabricar muelles cónicos y cuchillos. *Fuente:* Según J. Holub.

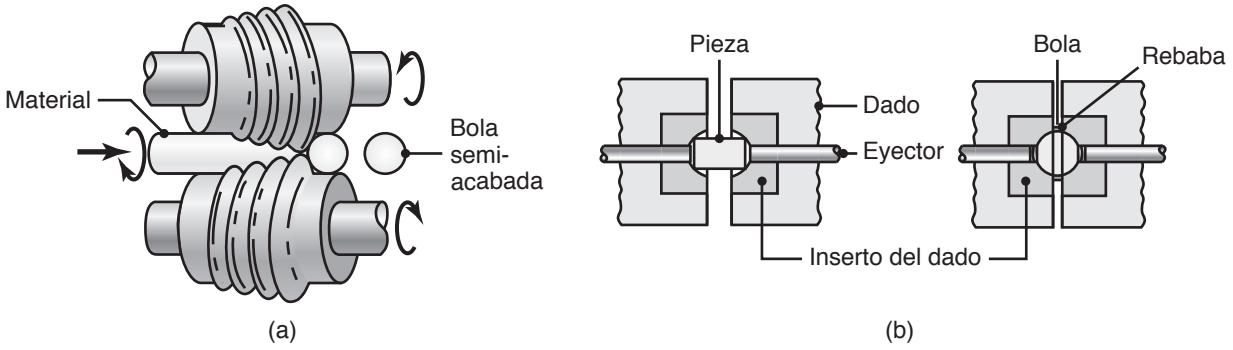


FIGURA 13.14 (a) Producción de bolas de acero mediante el proceso de laminación oblicua. (b) Producción de bolas de acero utilizando una pieza cilíndrica: note la formación de rebaba. Las bolas hechas mediante estos procesos se esmerilan y pulen posteriormente para utilizarlas en cojinetes de bolas.

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.

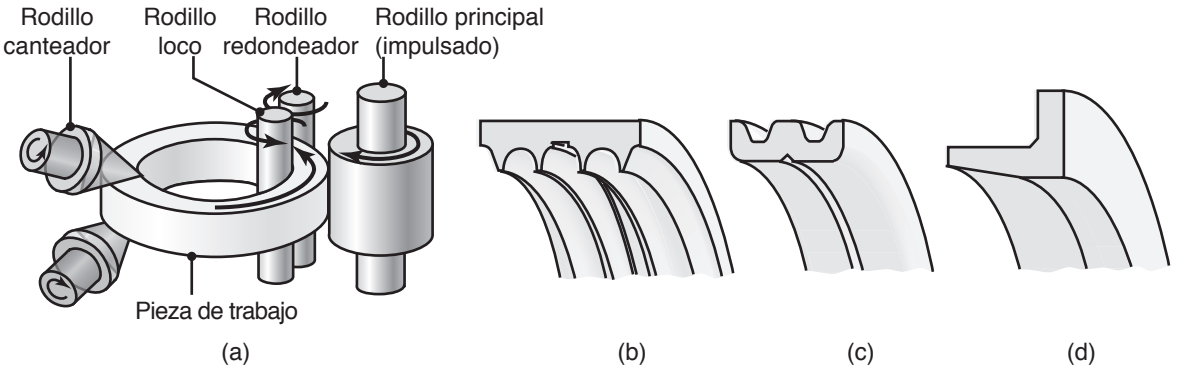


FIGURA 13.15 (a) Ilustración esquemática de una operación de laminación de anillo: la reducción del espesor resulta en un aumento del diámetro de la pieza. (b) a (d) Ejemplos de secciones transversales que pueden formarse mediante la laminación de anillo.

Código QR 13.3 Operaciones de laminación de anillo. (*Fuente:* Cortesía de la Forg-ing 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 alambrón. Las roscas se forman sobre la varilla o el alambrón 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

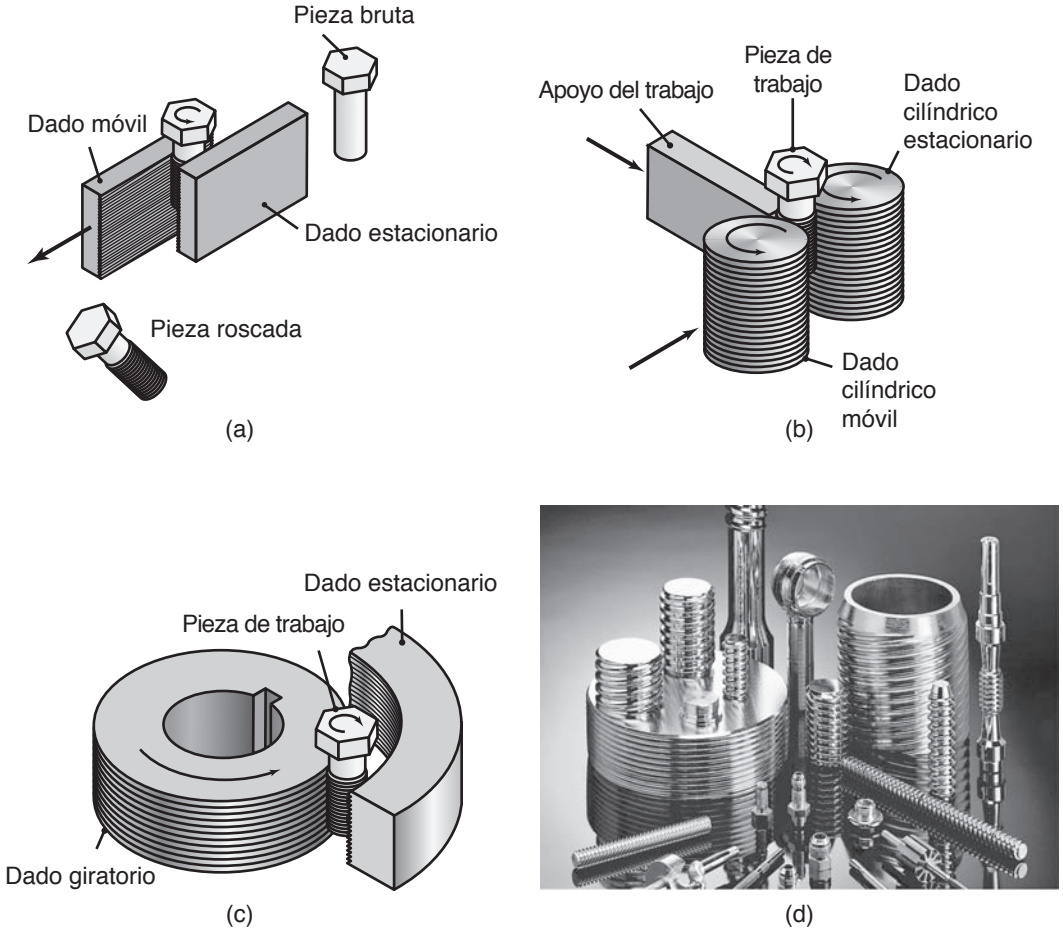


FIGURA 13.16 Procesos de laminación de roscas: (a) dados planos recíprocos usados para producir un tornillo; (b) dado de dos rodillos; (c) dado giratorio o planetario y (d) colección de piezas roscadas laminadas que se fabrican económicamente a altas tasas de producción. *Fuente:* (d) cortesía de Tesker Manufacturing Corp., Saukville, Wisconsin.

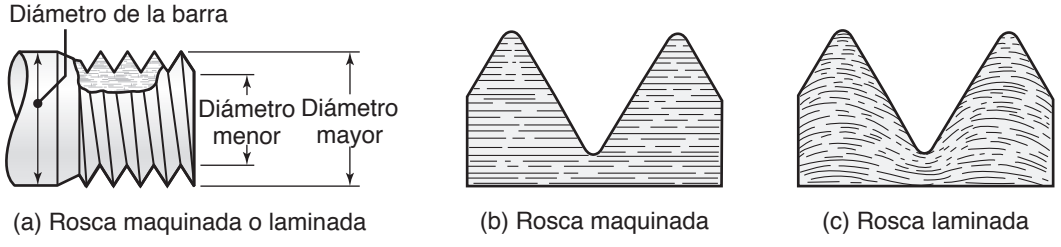


FIGURA 13.17 (a) Características de una rosca maquinada o laminada. Flujo de grano en las roscas (b) maquinada y (c) laminada. A diferencia del maquinado, que corta a través de los granos del metal, la laminación de roscas imparte una resistencia mejorada gracias al trabajo en frío y al favorable flujo del grano.

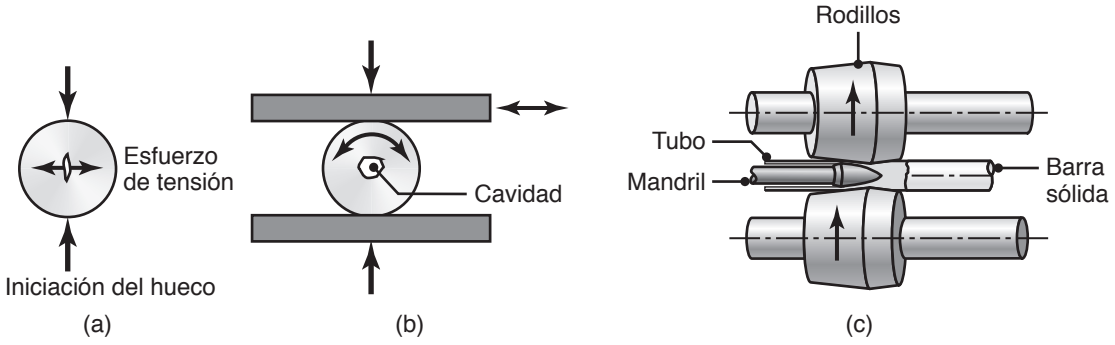


FIGURA 13.18 Formación de cavidad en un sólido, barra redonda y su utilización en el proceso de mandrilado de tubo giratorio para fabricar tubería sin costura (vea también la figura 2.9).

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

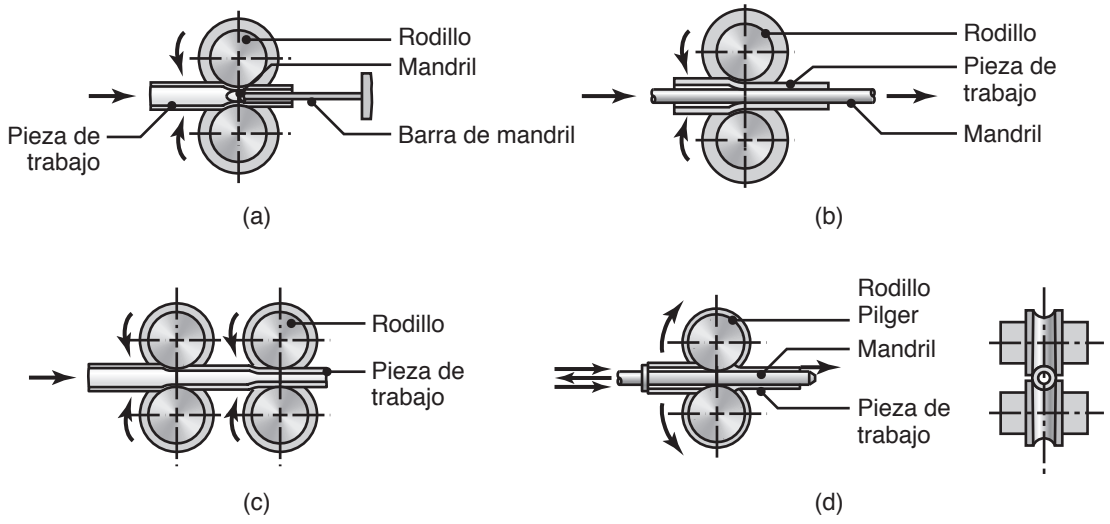


FIGURA 13.19 Ilustración esquemática de diversos procesos de laminación de tubos: (a) con un mandril fijo; (b) con un mandril flotante; (c) sin mandril y (d) laminación Pilger sobre un mandril y un par de rodillos para dar forma. Los diámetros y espesores del tubo también pueden cambiarse mediante otros 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
Bastidor de rodillo
Combadura
Corona
Ensanchado
Estructura de colada
Estructura forjada
Forjado con rodillos
Lagartismo
Lámina
Laminación
Laminación de anillo
Laminación de conjunto
Laminación de forma o perfil
Laminación de roscas
Laminación de tubos
Laminación en caliente
Laminación en frío
Laminación en tándem
Laminación oblicua
Laminación plana
Laminación Steckel
Mandrilado de tubo giratorio
Minimolino

Molino de desbaste
Molino de laminación
Molino Pilger
Molino Sendzimir
Número de calibre
Palanquilla
Papel aluminio
Pase
Placa
Planchón
Proceso de Mannesmann
Punto neutro
Rodillo
Temple por laminación
Tensión frontal
Tensión posterior
Tocho
Traqueteo

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 μm; 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.

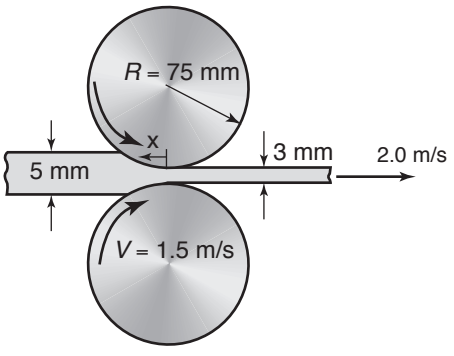


FIGURA P13.39

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, recalcado 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 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 recalcado 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

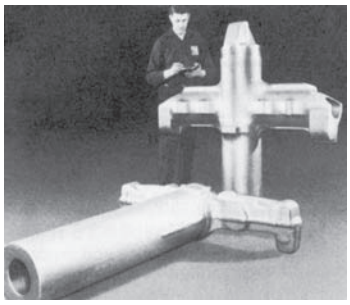
14.1 Introducción

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.

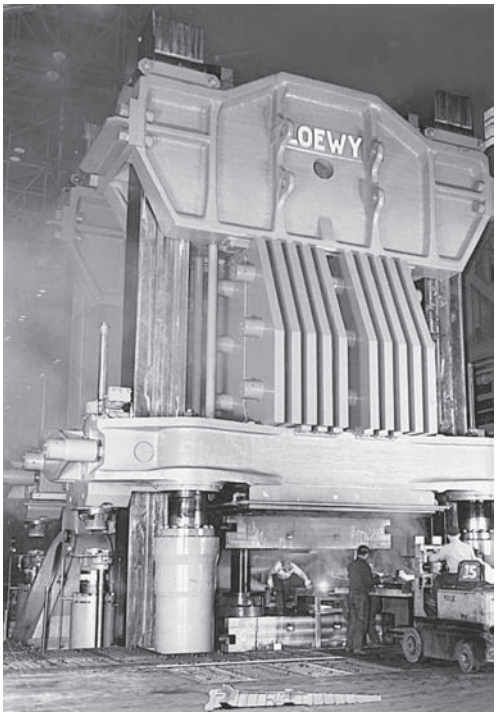
A diferencia de las operaciones de laminado, descritas en el capítulo 13, que generalmente producen placas continuas, láminas, tiras y diferentes secciones transversales estructurales, las operaciones de forjado producen piezas discretas. Debido a que el flujo de metal en un dado y la estructura de grano 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.

Código QR 14.1 ¿Qué es el forjado? (*Fuente:* Cortesía de Forging Industry Association, www.forging.org).

(a)

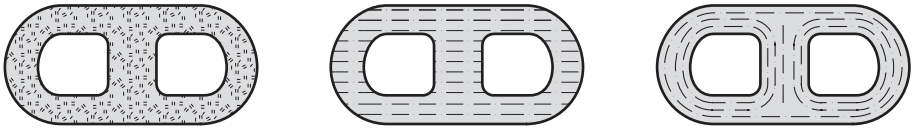


(b)



(c)

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.



(a) Fundida (b) Maquinada (c) Forjada

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 homóloga, 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.

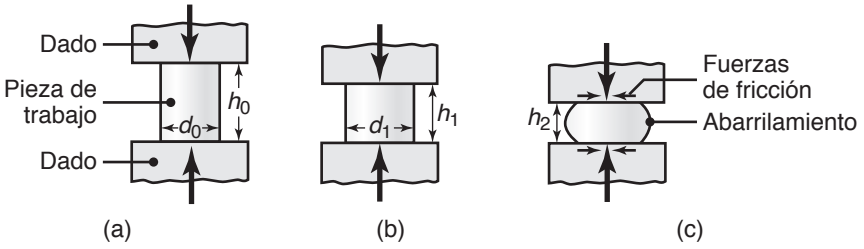


FIGURA 14.3 (a) Palanquilla cilíndrica sólida recalcada entre dos dados planos. (b) Deformación uniforme de la palanquilla sin fricción. (c) Deformación con fricción; observe el abarrilamiento de la palanquilla causado por las fuerzas de fricción en las interfases de la palanquilla con el dado.

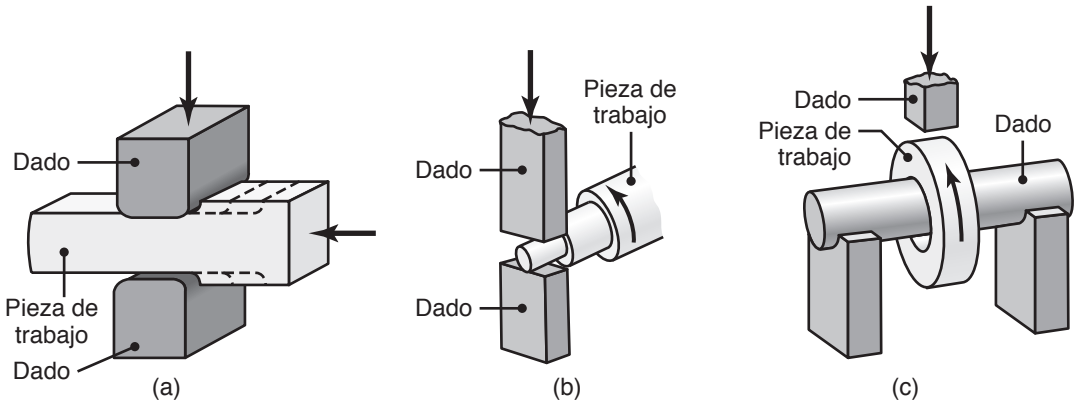


FIGURA 14.4 (a) Ilustración esquemática de una operación de forja de desbaste en una barra rectangular. Los herreros utilizan este proceso para reducir el grosor de las barras mediante el martillado de la pieza sobre un yunque; la reducción del grosor está acompañada de abarrilamiento. (b) Reducción 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 interfases 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

$$F = Y_f \pi r^2 \left(1 + \frac{2\pi r}{3h}\right), \tag{14.1}$$

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.

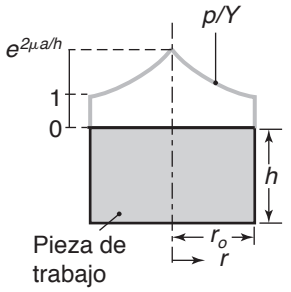


FIGURA 14.5 Distribución de la presión del dado en el recalcado con fricción por deslizamiento. Observe que en el radio exterior la presión es igual al esfuerzo de flujo, Y, del material. La fricción por deslizamiento significa que el esfuerzo de fricción es directamente proporcional al esfuerzo normal.

Colina de rozamiento. Considere el recalcado 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

$$p = Ye^{2\mu(r_o - r)/h}. \tag{14.2}$$

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*.

EJEMPLO 14.1 Cálculo de la fuerza de forjado en el recalcado

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,

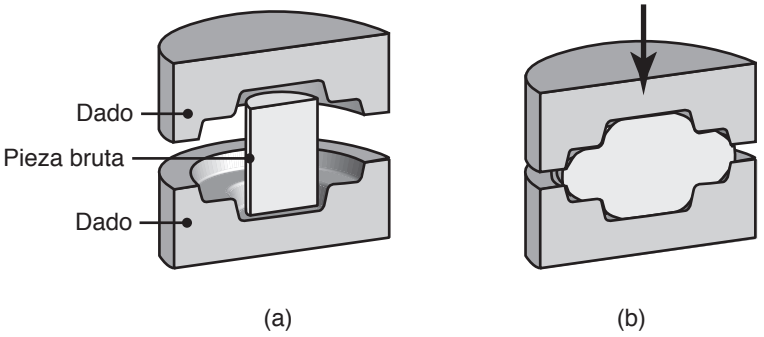
$$F = (1000 \times 10^6)(\pi)(0.106)^2(1) + \frac{(2)(0.2)(0.106)}{(3)(0.050)}$$

$$= 4.5 \times 10^7 \text{ N} = 45 \text{ MN} = 10^7 \text{ lb} = 5000 \text{ tons}.$$

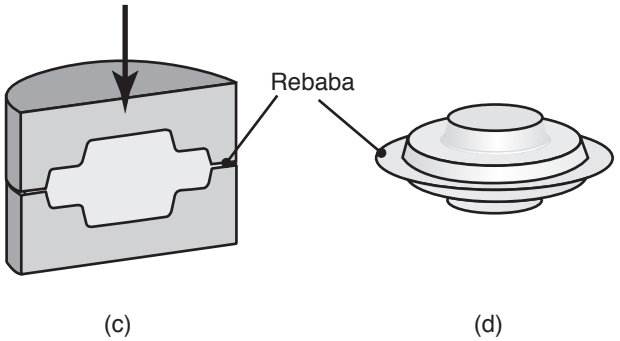
14.3 Forjado con dado impresor y en dado cerrado

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).



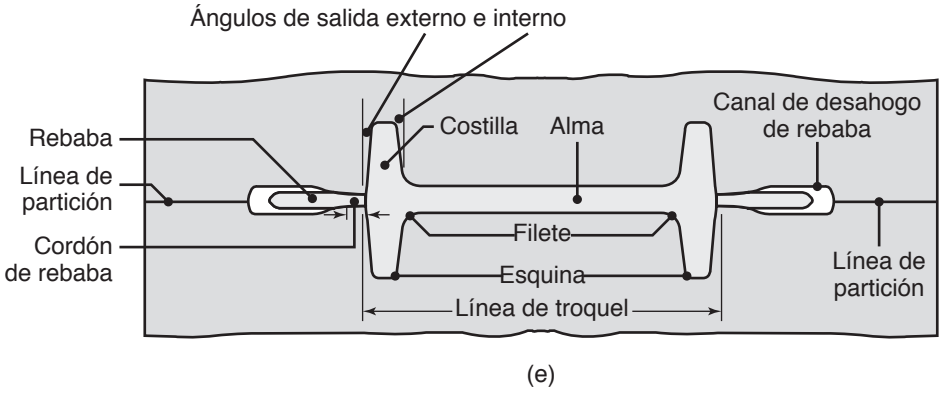


FIGURA 14.6 (a) a (d) Etapas del forjado con dado impresor de una palanquilla sólida y redonda; observe la formación de rebaba, la cual es metal en exceso que se troquela posteriormente. (e) Terminología estándar para las diferentes características de un dado de forja.

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.

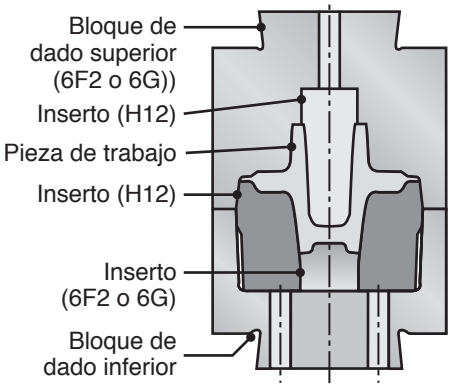


FIGURA 14.7 Insertos de dado utilizados en la forja de una carcasa para el eje de un automóvil (vea en la sección 5.7 los materiales que se utilizan para fabricar dados).

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

$$F = kY_f A, \tag{14.3}$$

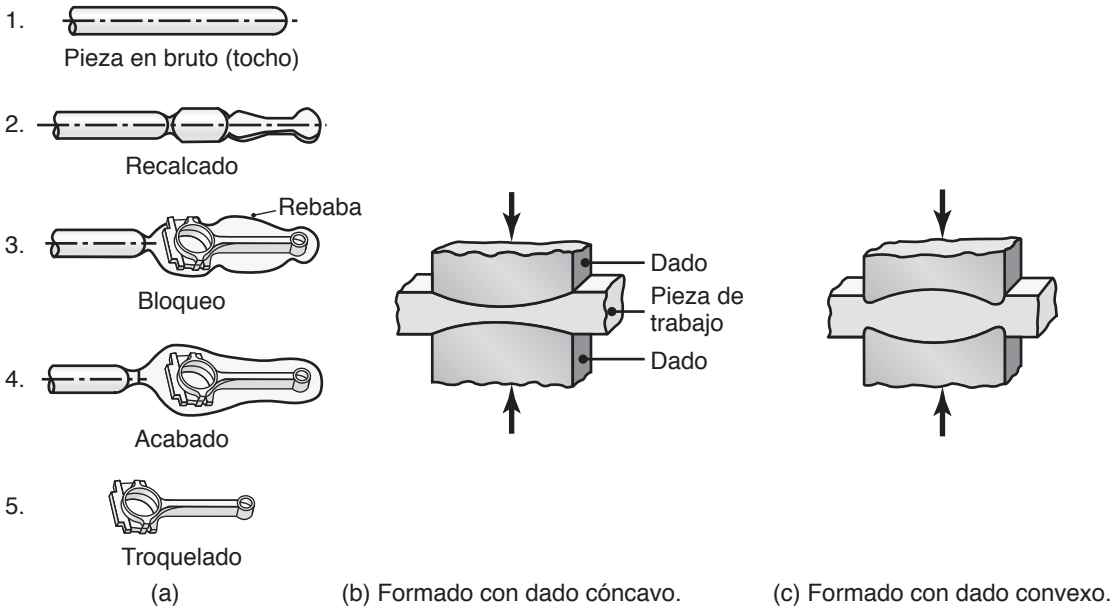


FIGURA 14.8 (a) Etapas en el forjado de una biela para un motor de combustión interna; observe la cantidad de rebaba necesaria para asegurar el llenado correcto de las cavidades del dado. Operaciones de formado (b) con dado cóncavo y (c) con dado convexo para distribuir adecuadamente el material, preformando la pieza en bruto para el forjado.

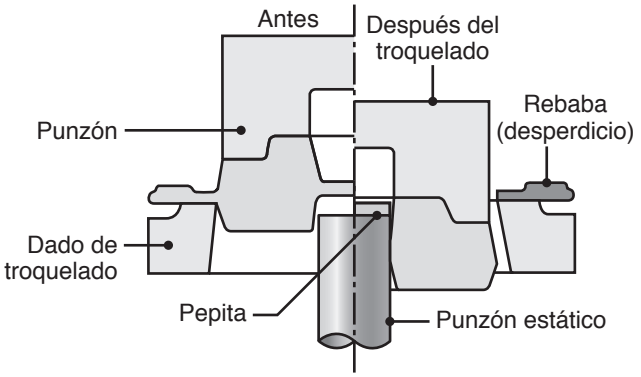


FIGURA 14.9 Troquelado de rebaba en una pieza forjada; al centro de la figura, observe que el material delgado (pepita) se elimina por punzonado.

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 pulg^2. 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.

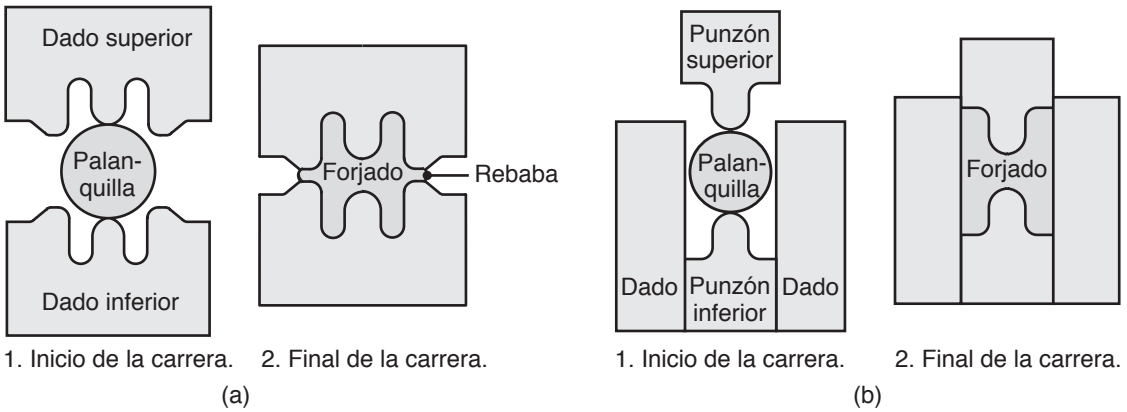


FIGURA 14.10 Comparación de (a) el forjado en dado cerrado con rebaba y (b) el forjado de precisión sin rebaba de una palanquilla redonda. *Fuente:* Según H. Takemasu, V. Vazquez, B. Painter y T. Altan.

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. Cierto 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 rectificado.
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 recalcado**; el *cabeceado* es, esencialmente, una operación de recalcado efectuada en el extremo de una barra o un alambrón 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

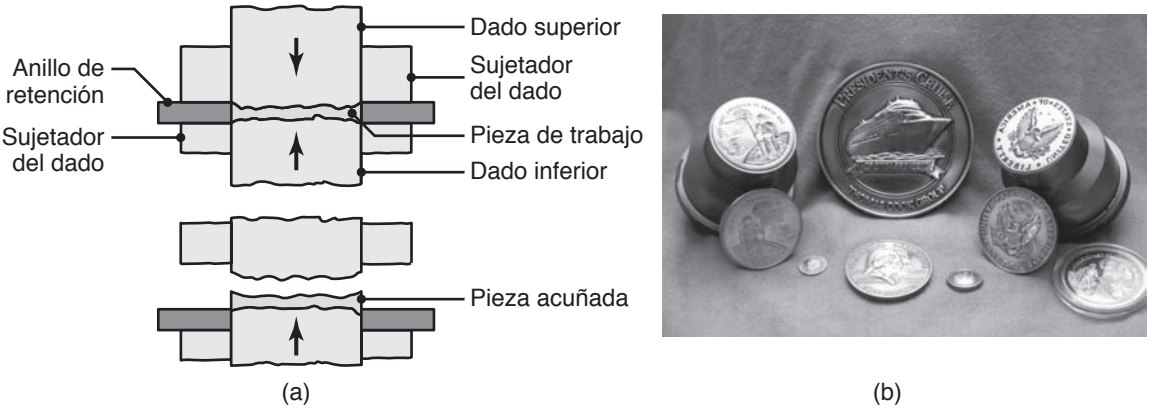


FIGURA 14.11 (a) Ilustración esquemática del proceso de acuñado; las primeras monedas (vea la tabla I.2) se hacían por forjado en dado abierto y carecían de precisión y detalles finos. (b) Ejemplo de una operación de acuñado moderna, donde se muestran las monedas y las herramientas; observe el detalle y el acabado superficial superiores que pueden lograrse en este proceso. *Fuente:* Cortesía de C & W Steel Stamp Company Inc.

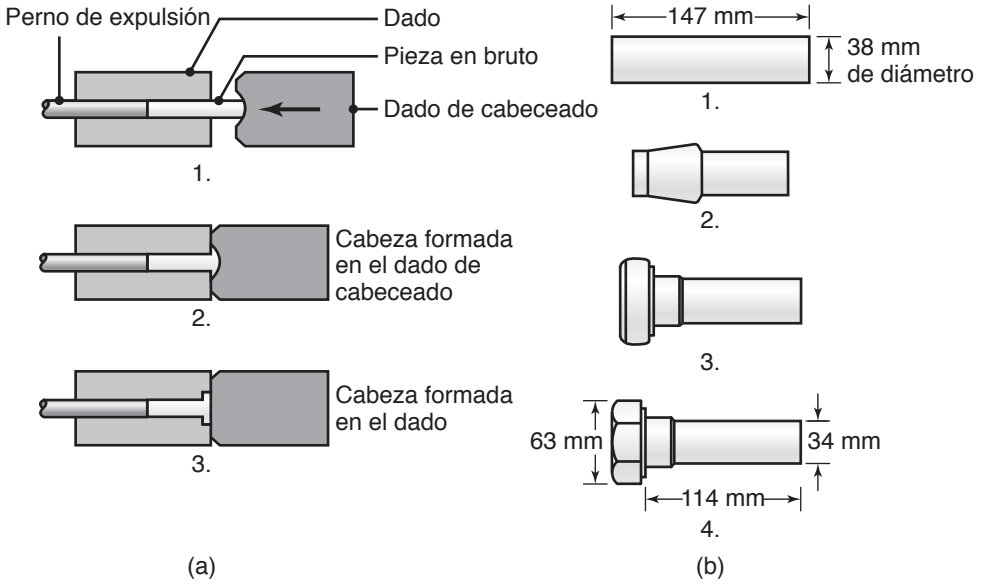


FIGURA 14.12 (a) Operación de cabeceado para formar cabezas en sujetadores, como clavos y remaches. (b) Secuencia de operaciones en la producción de una cabeza de perno típica mediante cabeceado.

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.

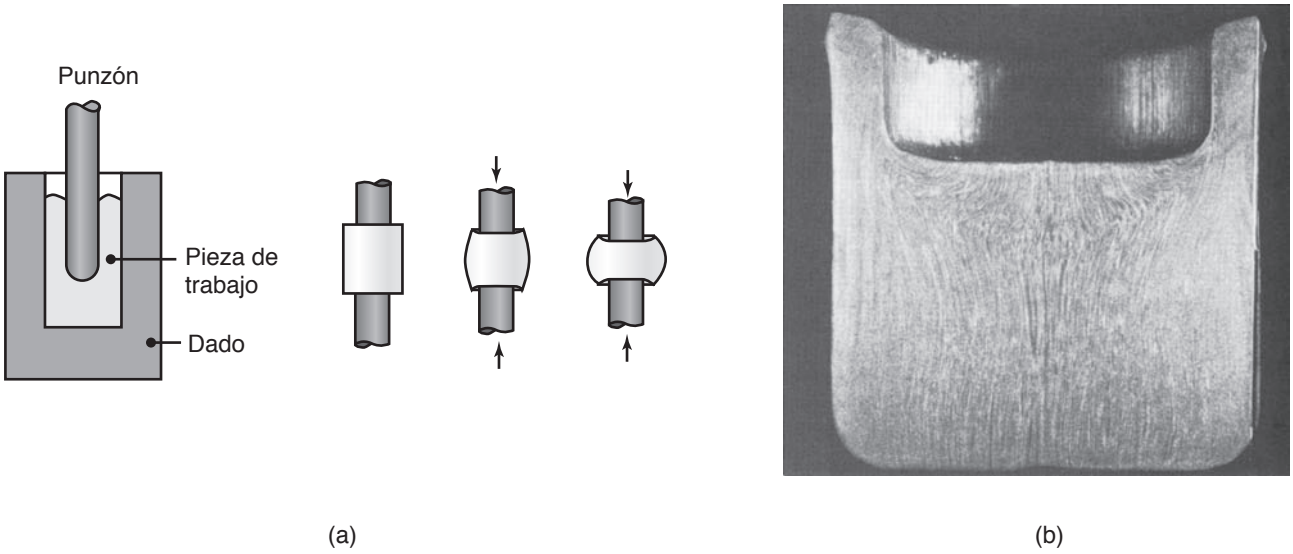


FIGURA 14.13 (a) Ejemplos de operaciones de penetrado. (b) Palanquilla redonda penetrada que muestra un patrón de flujo de grano (vea también la figura 14.2c). *Fuente:* Cortesía de Ladish Co., Inc.

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 interfases 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 cilíndrica (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*)

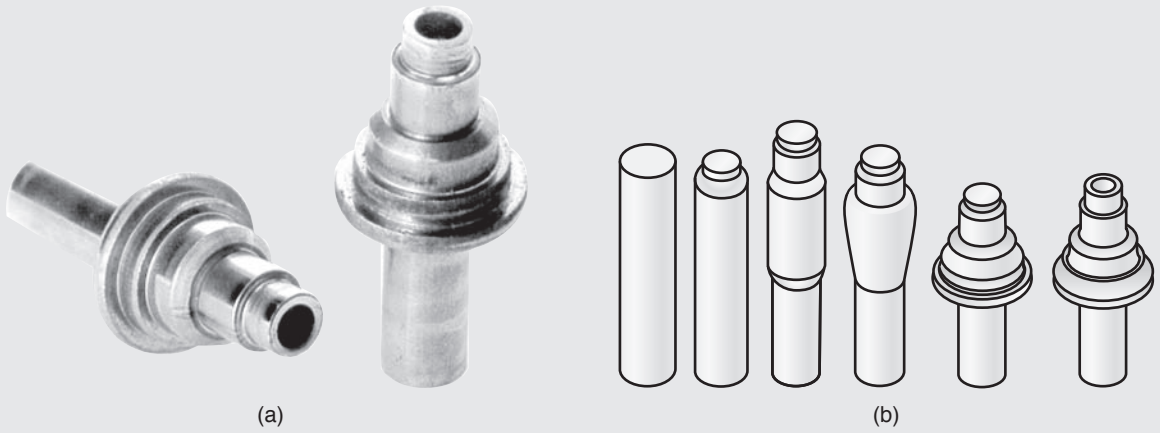


FIGURA 14.14 (a) Pasador escalonado utilizado en el caso de estudio 14.1. (b) Ilustración de los pasos de manufactura utilizados para producir el pasador escalonado. *Fuente:* Cortesía de National Machinery, LLC.

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

$$\text{Fuerza del punzonado de cavidades} = 3(\text{UTS})(A), \tag{14.4}$$

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 UTS = 1500 MPa y una pieza con un área proyectada de 400 mm^2, la fuerza del punzonado de cavidades es (3)(1500 N/mm^2) (400 mm^2) = 1.8 MN = 179 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.

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

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).

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.

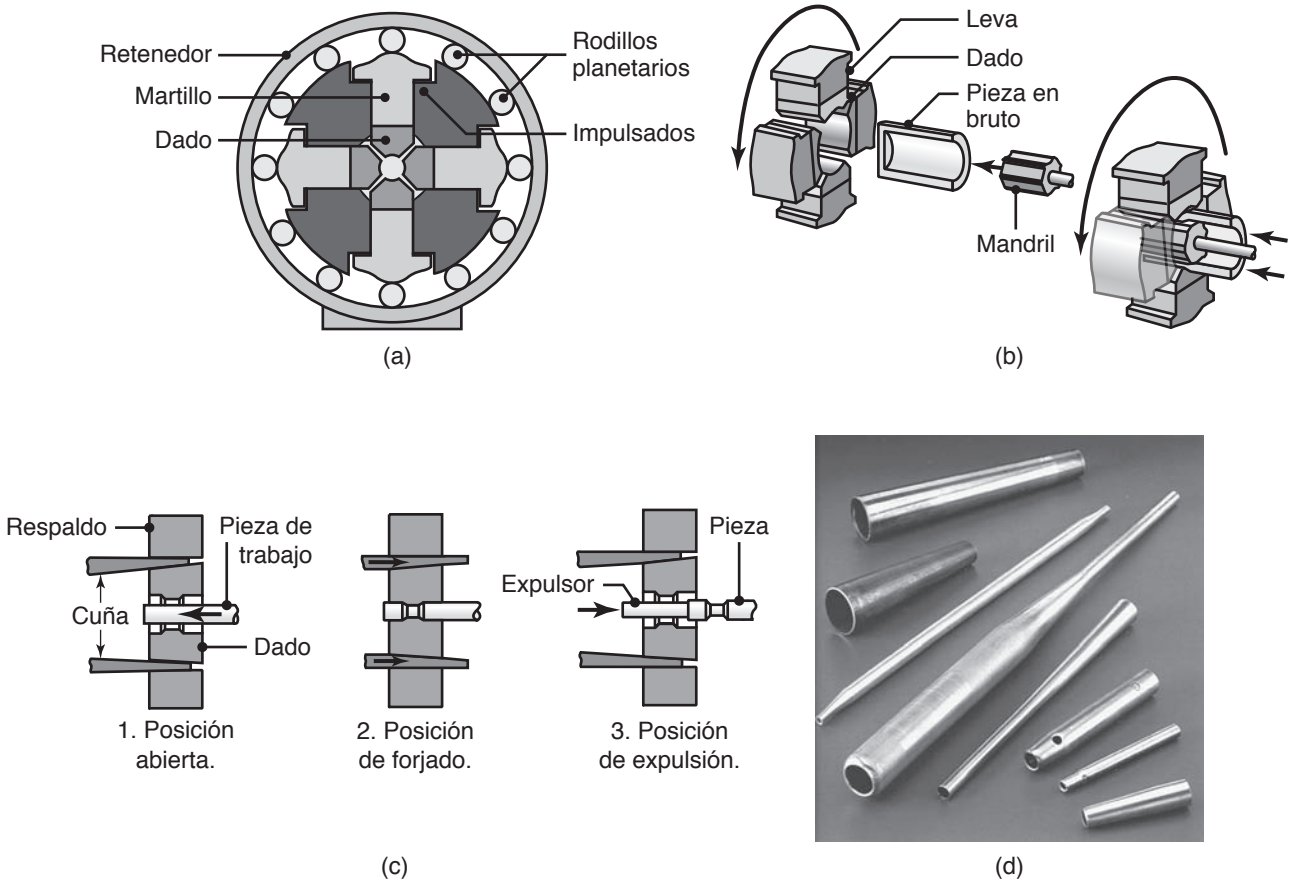


FIGURA 14.15 (a) Ilustración esquemática del proceso de forjado rotativo. (b) Formación de los perfiles internos en una pieza tubular por forjado rotativo. (c) Máquina de forjado rotativo en dado cerrado que muestra la formación de un eje escalonado. (d) Piezas típicas hechas por forjado rotativo. *Fuente:* (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.

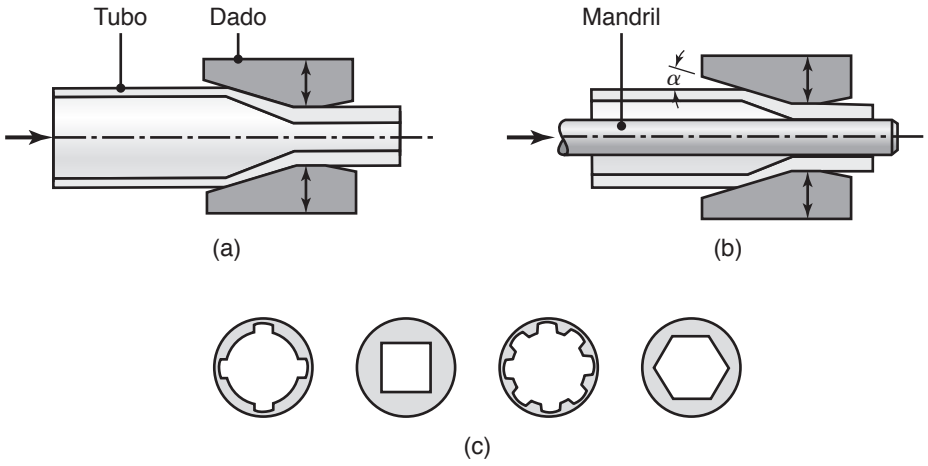


FIGURA 14.16 (a) Extrusión o recalcado de tubos sin un mandril; observe el aumento del grosor de la pared en el espacio entre dados. (b) Extrusión de tubos con un mandril; note que el grosor final de la pared del tubo depende del diámetro del mandril. (c) Ejemplos de secciones transversales de tubos 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

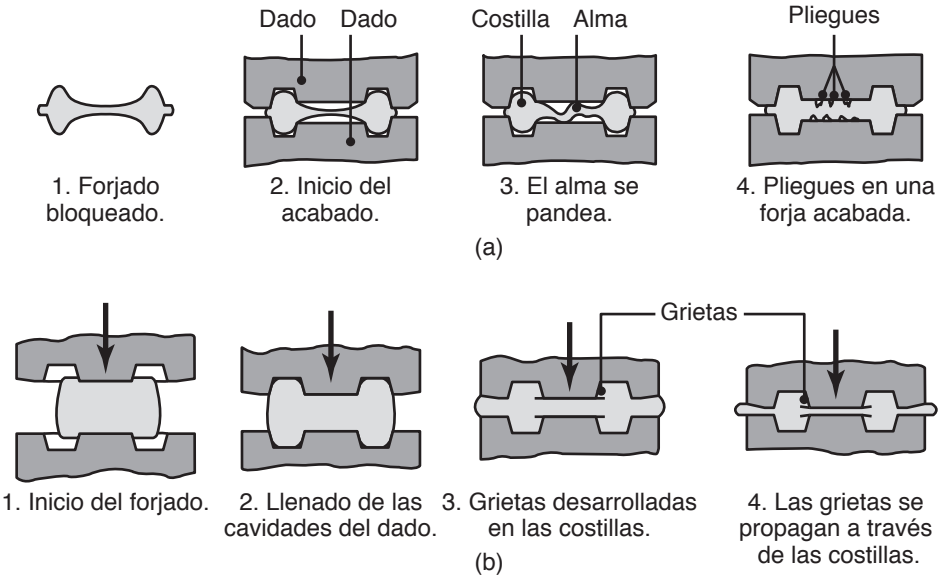


FIGURA 14.17 Ejemplos de defectos en piezas forjadas. (a) Pliegues debidos al pandeo del alma durante el forjado; para evitar este problema, se debe incrementar el grosor del alma. (b) Defectos internos causados por una palanquilla de gran tamaño; las cavidades del dado se llenan prematuramente y en 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.

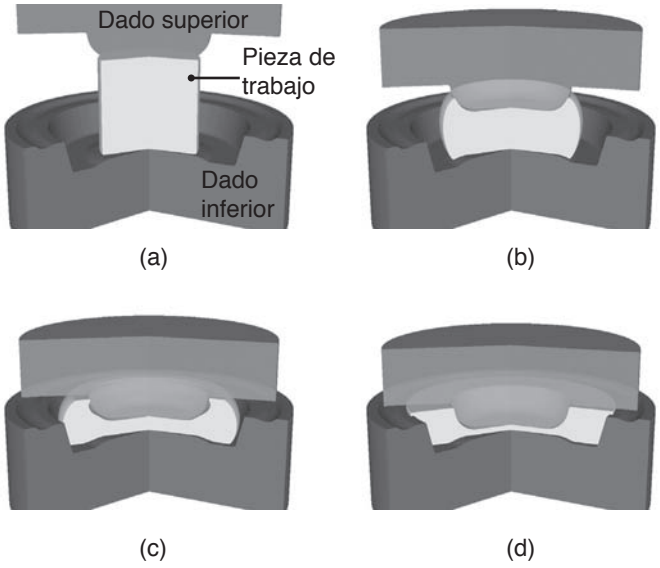


FIGURA 14.18 Deformación de una pieza en bruto durante el forjado según lo previsto por el programa de software DEFORM basado en el método de análisis del elemento finito. *Fuente:* Cortesía de Scientific Forming Technologies Corporation.

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.

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 moldeado 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 herramentales 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.

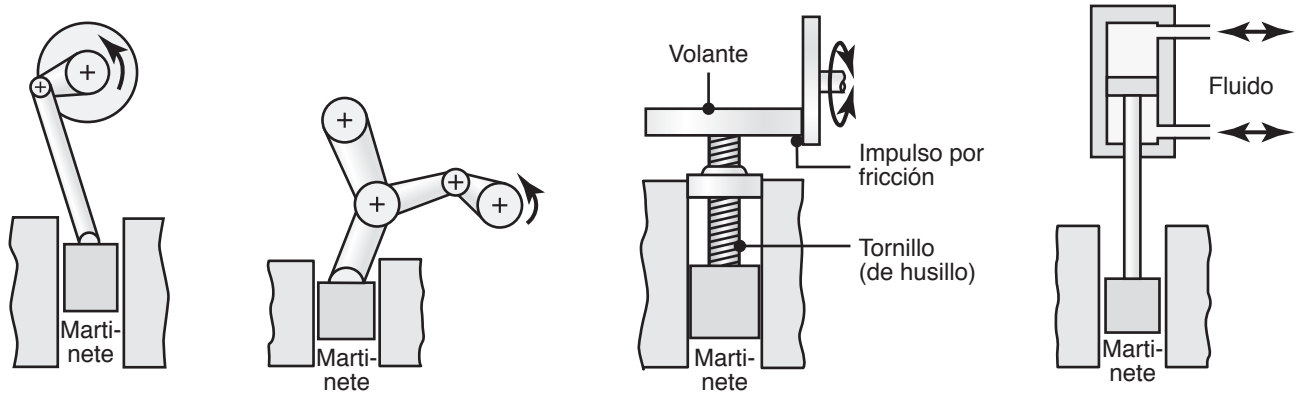
Fallas en los dados. Por lo general, las fallas son el resultado de una o más de las siguientes causas:

- 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).



(a) Biela-manivela. (b) Junta de rótula. (c) Tornillo (de husillo). (d) Hidráulica.

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-

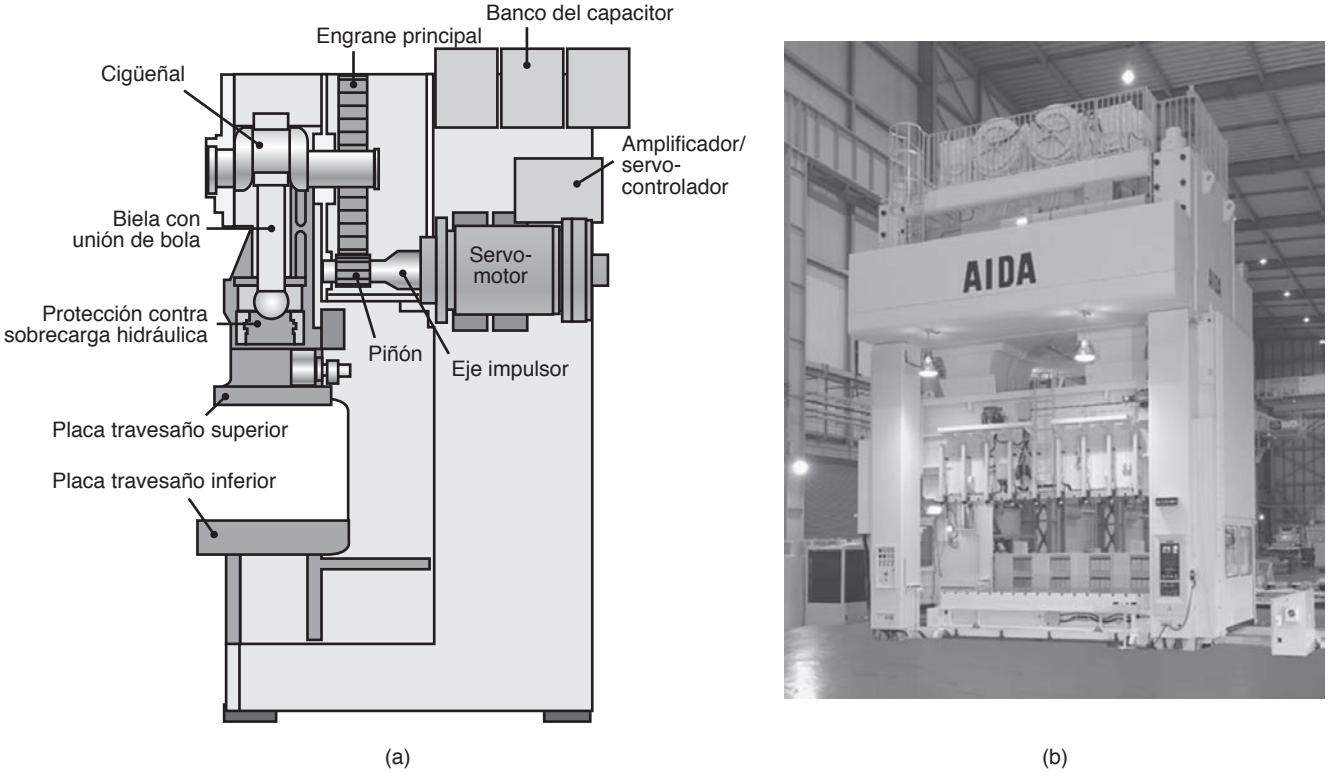


FIGURA 14.20 (a) Ilustración esquemática de una servoprensa con la fuente de energía y los componentes de la transmisión resaltados. (b) Ejemplo de una servoprensa con unos 23 000 kN (2500 tons) de capacidad. *Fuente:* Cortesía de Aida Engineering, Inc.

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

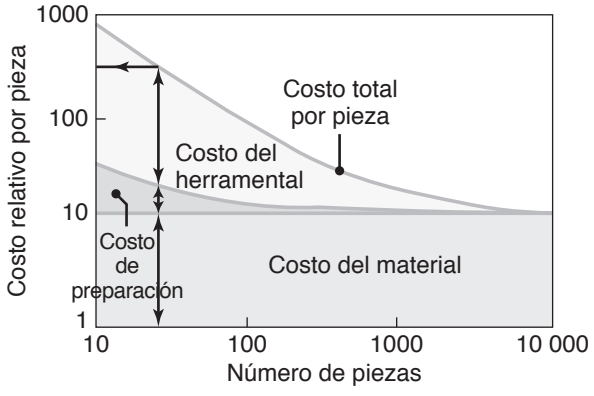


FIGURA 14.21 Costo típico por pieza (*costo unitario*) en el forjado; observe cómo los costos de preparación y del herramental por pieza disminuyen a medida que aumenta el número de piezas forjadas (si todas las piezas utilizan el mismo dado).

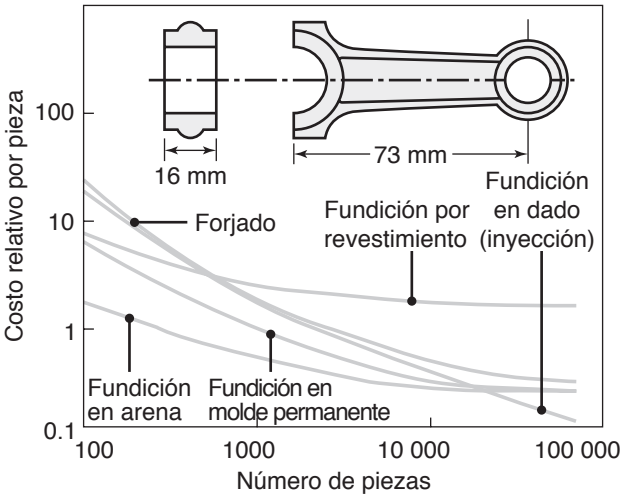


FIGURA 14.22 Costos relativos por pieza de una pequeña biela hecha mediante diversos procesos de forjado y fundición; observe que, para grandes cantidades, el forjado es más económico y que la fundición en arena es el proceso más económico para un número aproximado menor a 20 mil piezas.

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 herramentales costosos, 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*)

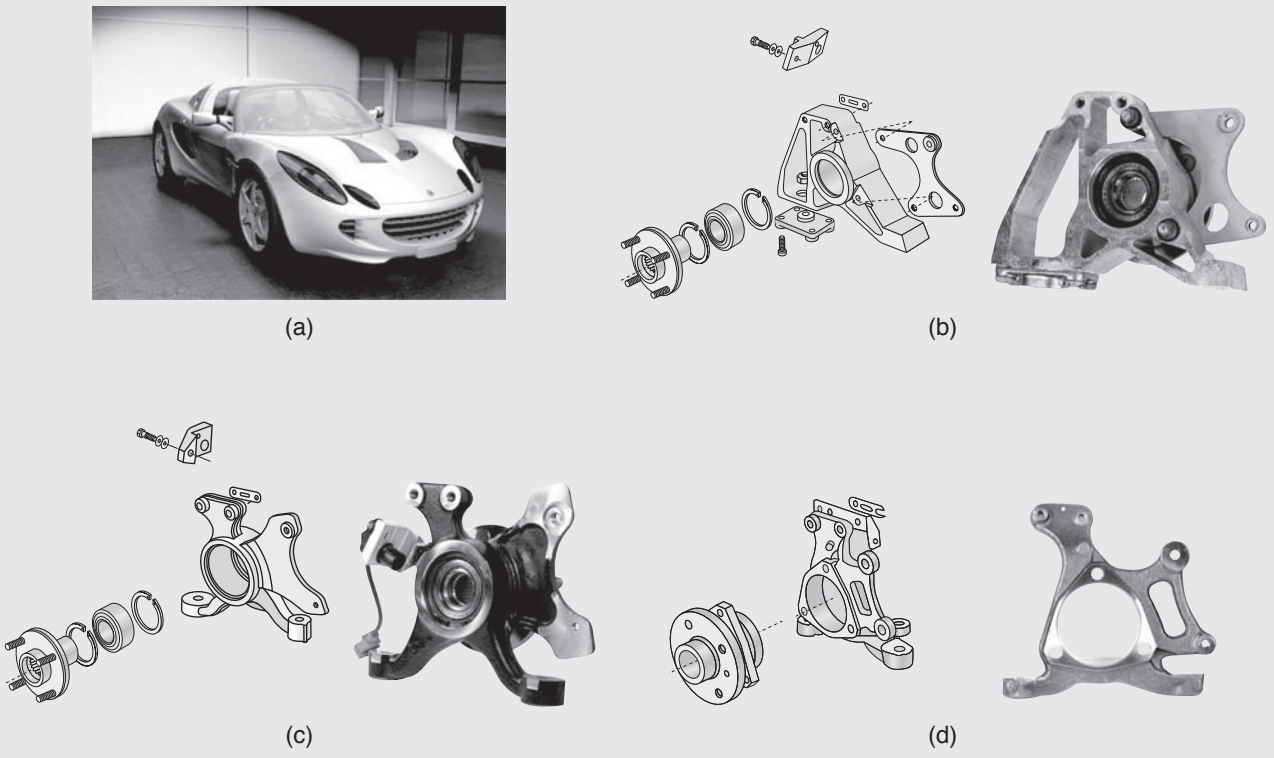


FIGURA 14.23 (a) Automóvil Lotus Elise Serie 2; (b) ilustración del diseño original de los soportes verticales de la suspensión utilizando una extrusión de aluminio; (c) diseño modificado usando acero forjado y (d) diseño con acero forjado optimizado para los nuevos modelos del automóvil. *Fuente:* (a) 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
Acuñado
Cabeceado
Calibrado
Forja de desbaste a martillo
Forjabilidad
Forjado
Forjado con dado impresor
Forjado de forma neta
Forjado de precisión
Forjado en dado abierto
Forjado en dado cerrado
Forjado incremental
Forjado isotérmico
Forjado orbital
Forjado rotativo
Formado con dado cóncavo
Formado con dado convexo
Granos en el extremo
Martillos
Penetrado
Prensas
Prueba de torsión en caliente
Punzonado de cavidades (clavado)
Rebaba
Recalcado

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 recalcado?
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.

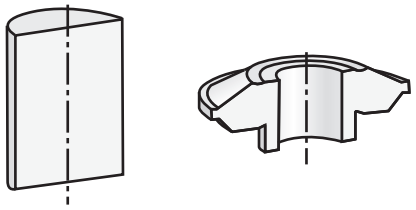


FIGURA P14.44

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 recalcado 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.

CAPÍTULO

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.

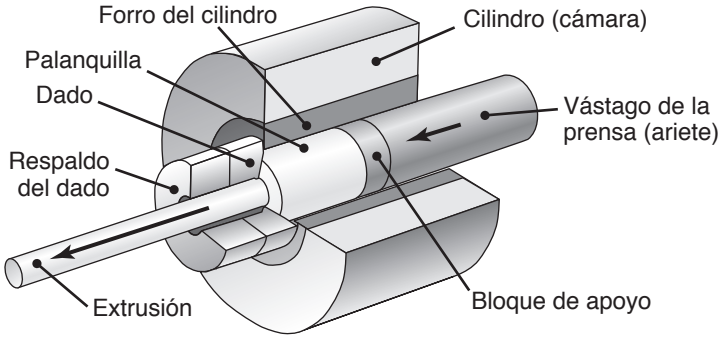


FIGURA 15.1 Ilustración esquemática del proceso de extrusión directa.

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.

Código QR 15.1 Extrusión de aluminio. (*Fuente:* Cortesía de PBC Linear, una compañía de Bearing Pacific).

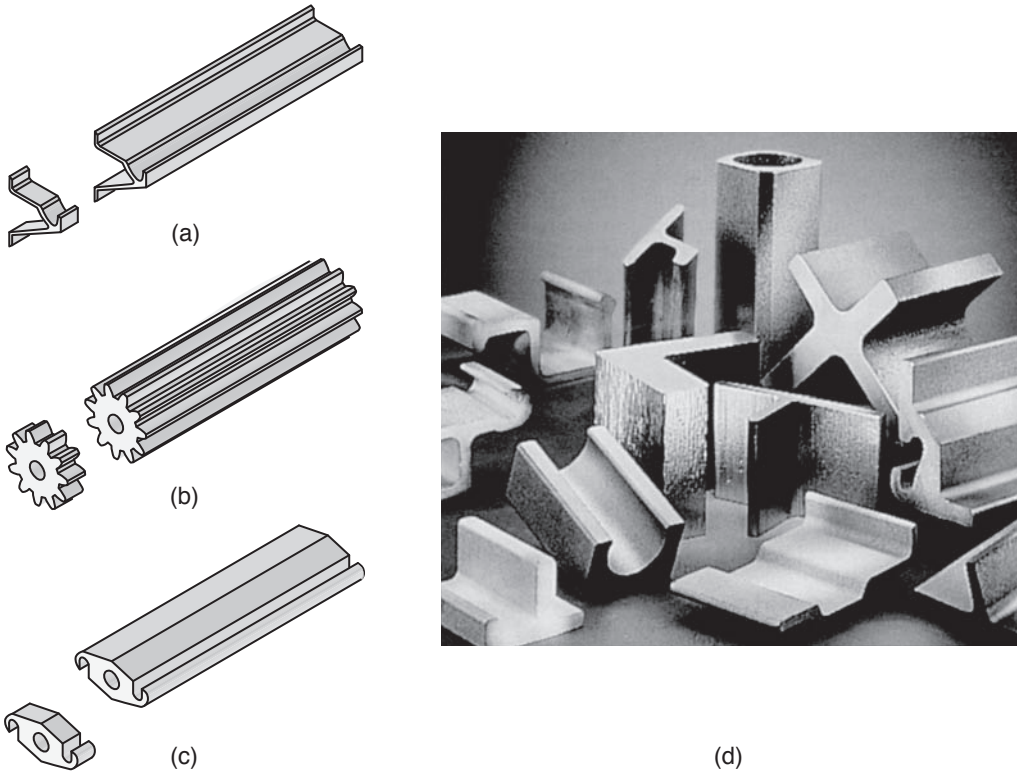


FIGURA 15.2 Extrusiones y ejemplos de productos fabricados mediante el seccionamiento de extrusiones. *Fuente:* (d) Cortesía de Plymouth Extruded Shapes (para la extrusión de plásticos, vea la sección 19.2).

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.

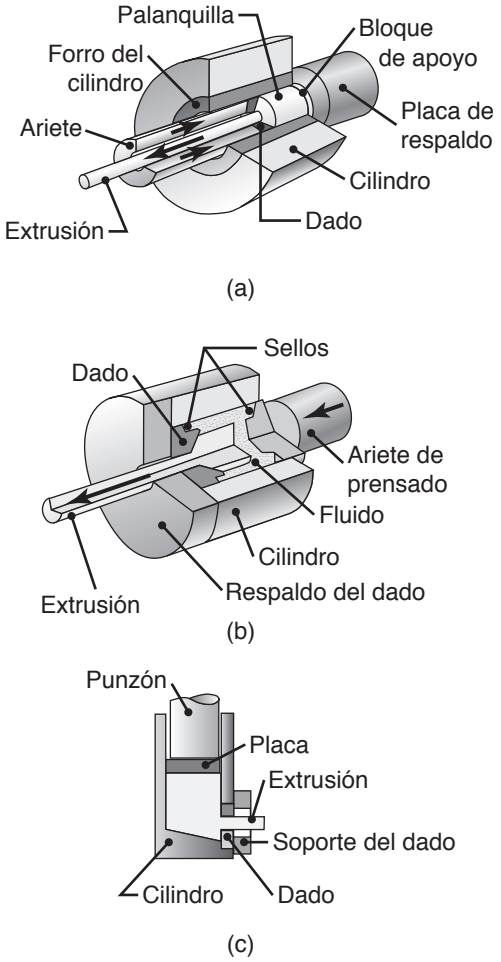


FIGURA 15.3 Tipos de extrusión: (a) indirecta; (b) hidrostática y (c) lateral.

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 inoxidables 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.

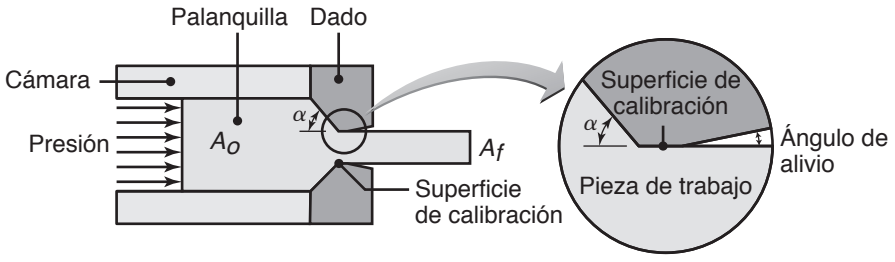


FIGURA 15.4 Variables del proceso en la extrusión directa; el ángulo del dado, la reducción de la sección transversal, la velocidad de extrusión, la temperatura de la palanquilla y la lubricación afectan a la presión de extrusión.

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

$$p = Y\left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu}\right)(R^{\mu \cot \alpha} - 1), \tag{15.1}$$

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

$$F = A_o k \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right), \tag{15.2}$$

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 cuadriculado. 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

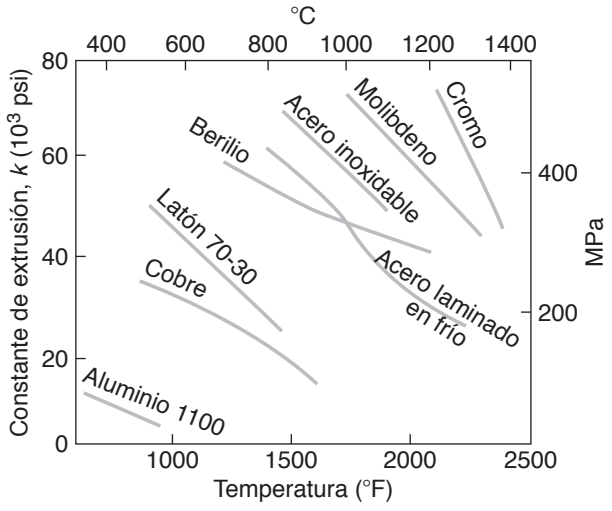


FIGURA 15.5 Constante de extrusión *k* para diversos metales a diferentes temperaturas de acuerdo con lo determinado experimentalmente. *Fuente:* Según P. Loewenstein.

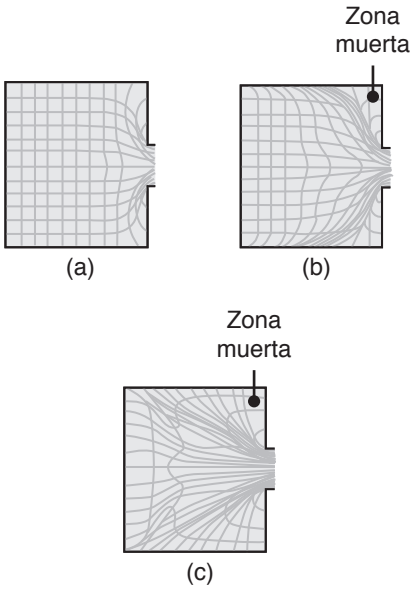


FIGURA 15.6 Tipos de flujo de metal en la extrusión con dados rectos. (a) Patrón de flujo obtenido a baja fricción o en la extrusión indirecta. (b) Patrón obtenido con alta fricción en las interfases de la palanquilla y la cámara. (c) Patrón obtenido a alta fricción o mediante enfriamiento de las regiones 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).

(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.

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.

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

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-

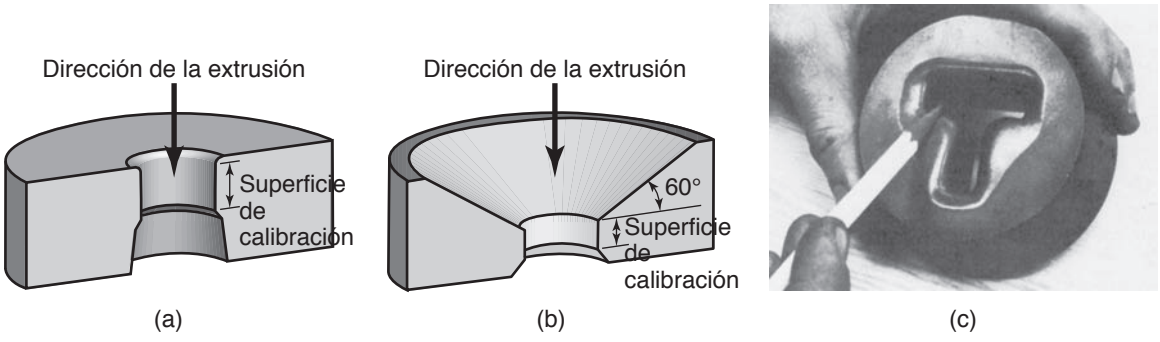


FIGURA 15.7 Formas típicas de dados para extrusión: (a) dado para metales no ferrosos; (b) dado para metales ferrosos; (c) dado para una extrusión en forma de T hecha de acero para trabajo en caliente y usada con vidrio fundido como lubricante. *Fuente:* (c) Cortesía de LTV Steel Company.

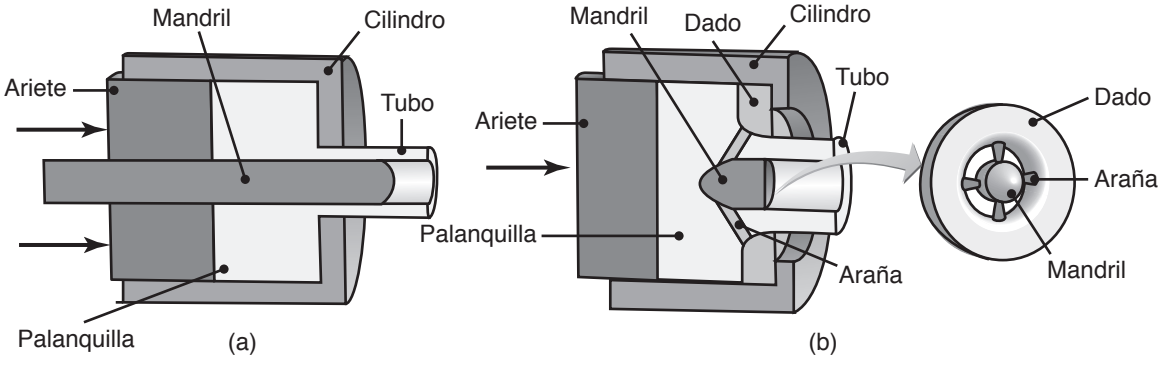


FIGURA 15.8 Extrusión de un tubo sin costura (a) utilizando un mandril interno que se mueve de manera independiente del ariete: un arreglo alternativo tiene el mandril integrado con el ariete y (b) empleando un dado de araña (vea la figura 15.9) para producir tubos sin costura.

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

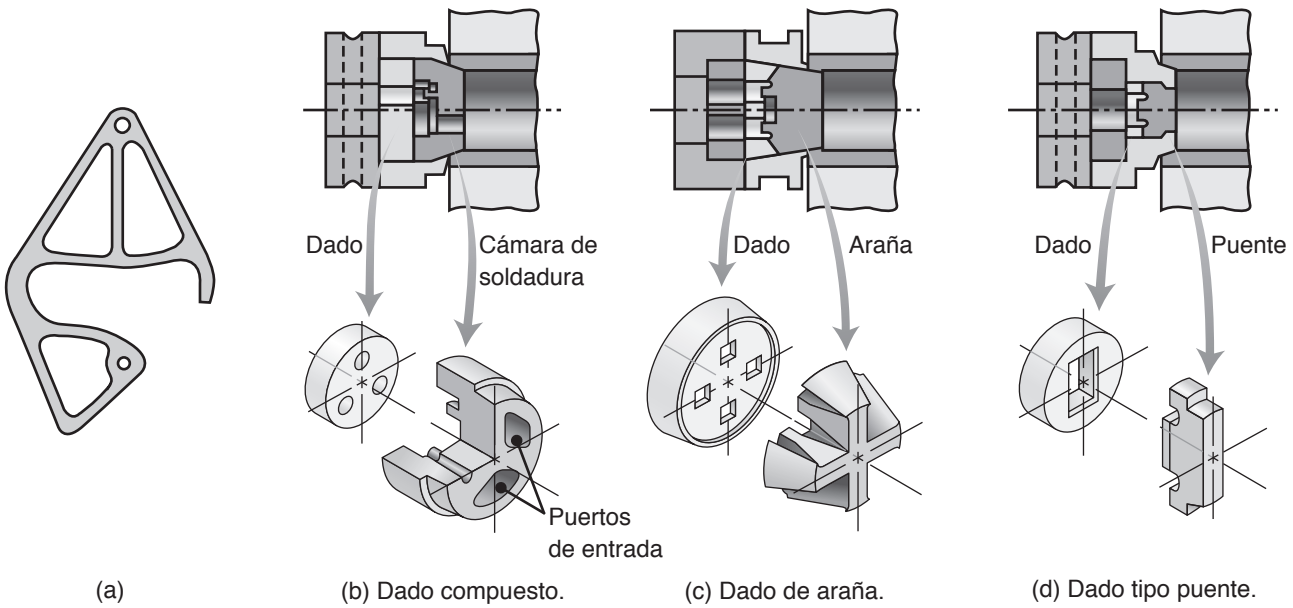


FIGURA 15.9 (a) Seguro para una escalera de extensión hecha de aluminio 6063-T6 extruido, esta pieza tiene un grosor de 8 mm (5/16 pulg) y se corta a partir de la extrusión (vea la figura 15.2). (b) a (d) Componentes de diversos dados para extruir formas huecas intrincadas.

un excelente lubricante para los aceros, aceros inoxidables 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.

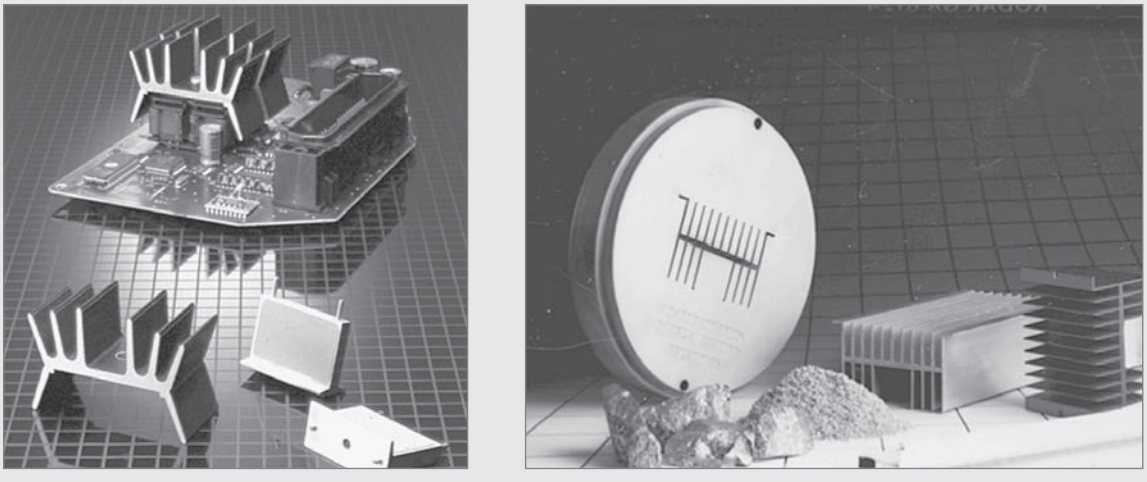
Para los metales que tienen tendencia a pegarse o incluso a soldarse al cilindro y al dado, la palanquilla puede encerrarse en una *camisa*, que es un contenedor de pared delgada hecho de un metal más suave y con resistencia más baja, como el cobre o hierro dulce. Este procedimiento se denomina **encamisado** 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.

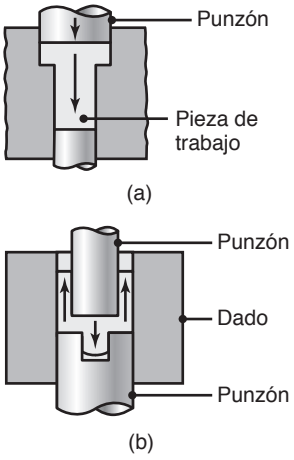


FIGURA 15.11 Dos ejemplos de extrusión en frío; las flechas indican la dirección del flujo de metal durante la extrusión.

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

$$F = 1.7 A_o Y_{\text{prom}} \epsilon, \tag{15.3}$$

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 herramentales y la selección de los materiales adecuados para los herramentales 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 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).

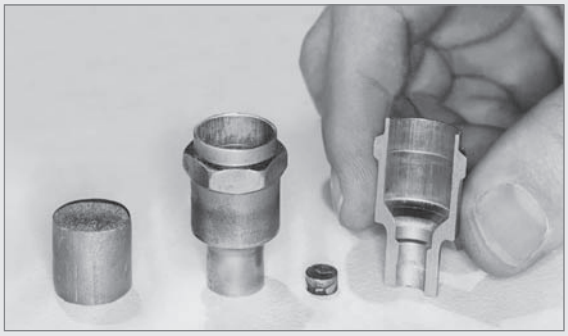


FIGURA 15.12 Pasos de producción para la parte metálica de una bujía extruida en frío. *Fuente:* Cortesía de National Machinery Company.

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.

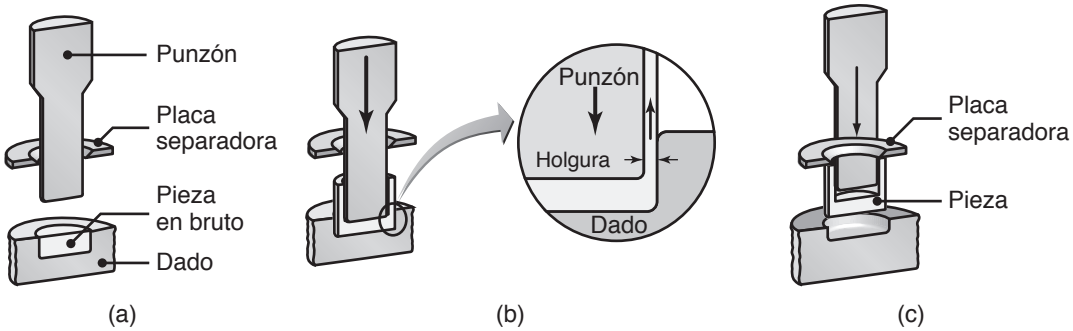


FIGURA 15.14 Ilustración esquemática del proceso de extrusión por impacto; las piezas extruidas se expulsan mediante el uso de una placa separadora.

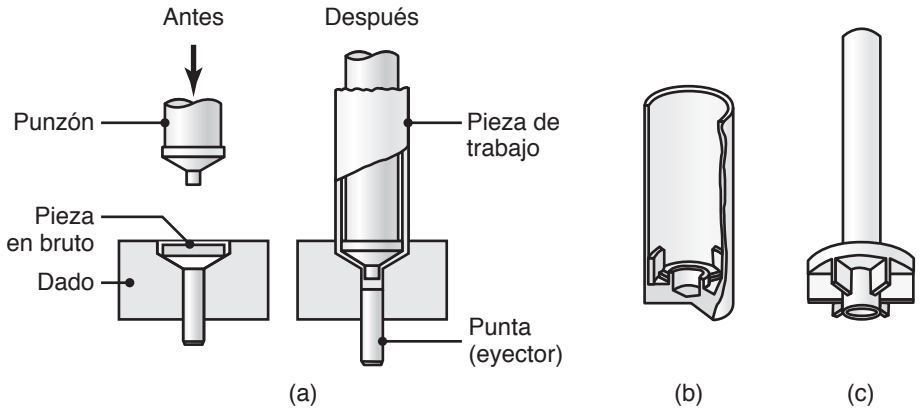


FIGURA 15.15 (a) Extrusión por impacto de un tubo plegable mediante el proceso de Hooker. (b) y (c) Dos ejemplos de productos fabricados mediante extrusión por impacto. Estas piezas también pueden hacerse por fundición, forjado o maquinado, la elección depende de los materiales, las dimensiones de las 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 maquinar 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

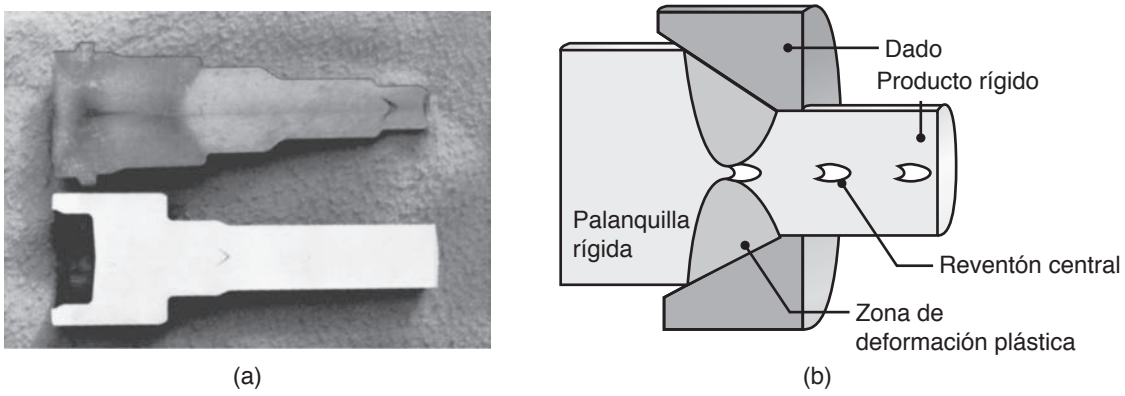


FIGURA 15.16 (a) Agrietamiento tipo "Chevron" (reventón central) en barras redondas de acero extruido; a menos que los productos se inspeccionen, tales defectos pueden quedar sin ser detectados y posteriormente provocar la falla de la pieza durante el servicio; este defecto puede desarrollarse también 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 *prensa 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,

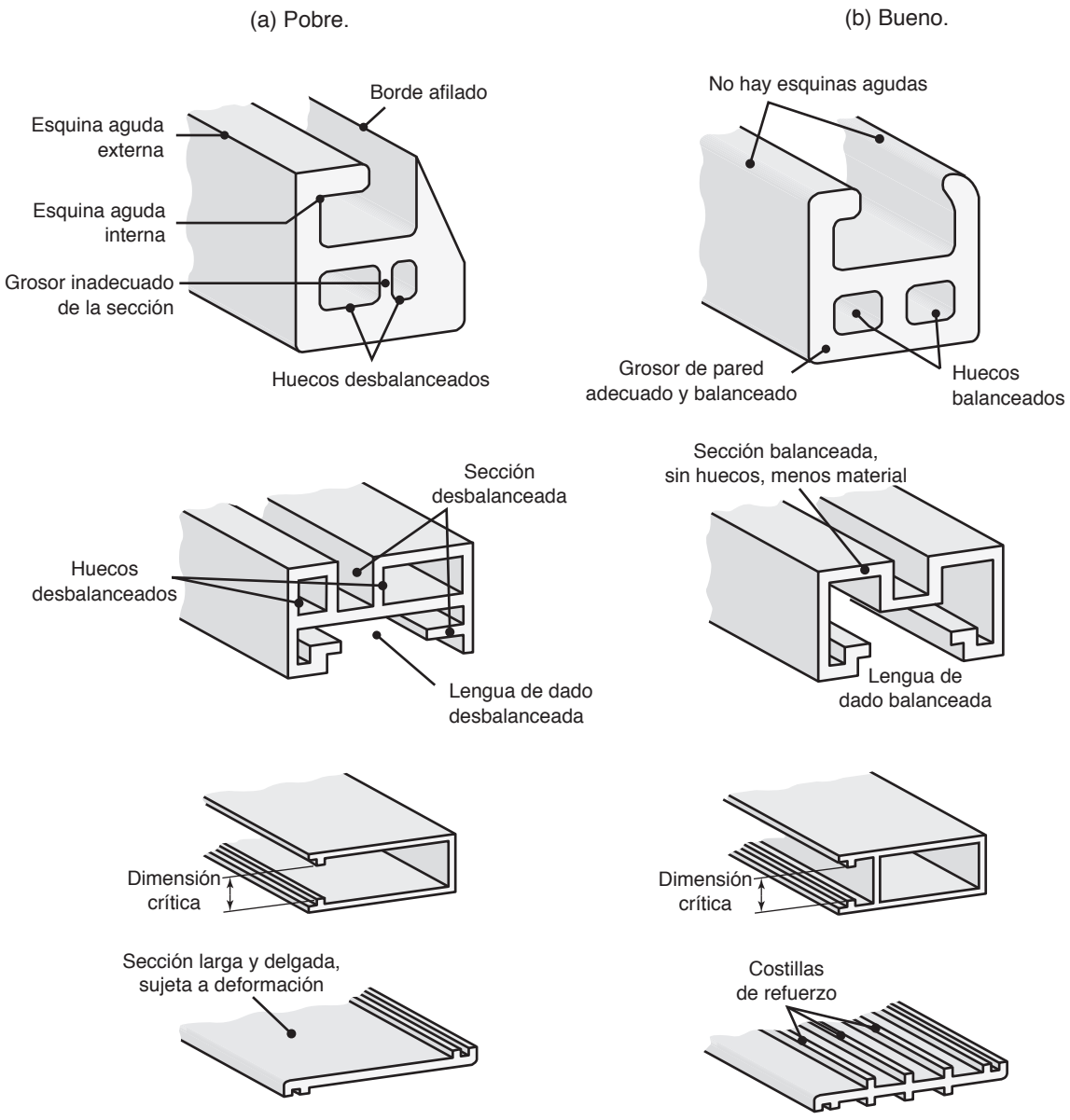


FIGURA 15.17 Ejemplos de prácticas de diseño pobres y buenas para la extrusión; observe la importancia de eliminar las esquinas agudas y mantener una sección de grosor uniforme.

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 alambrón 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

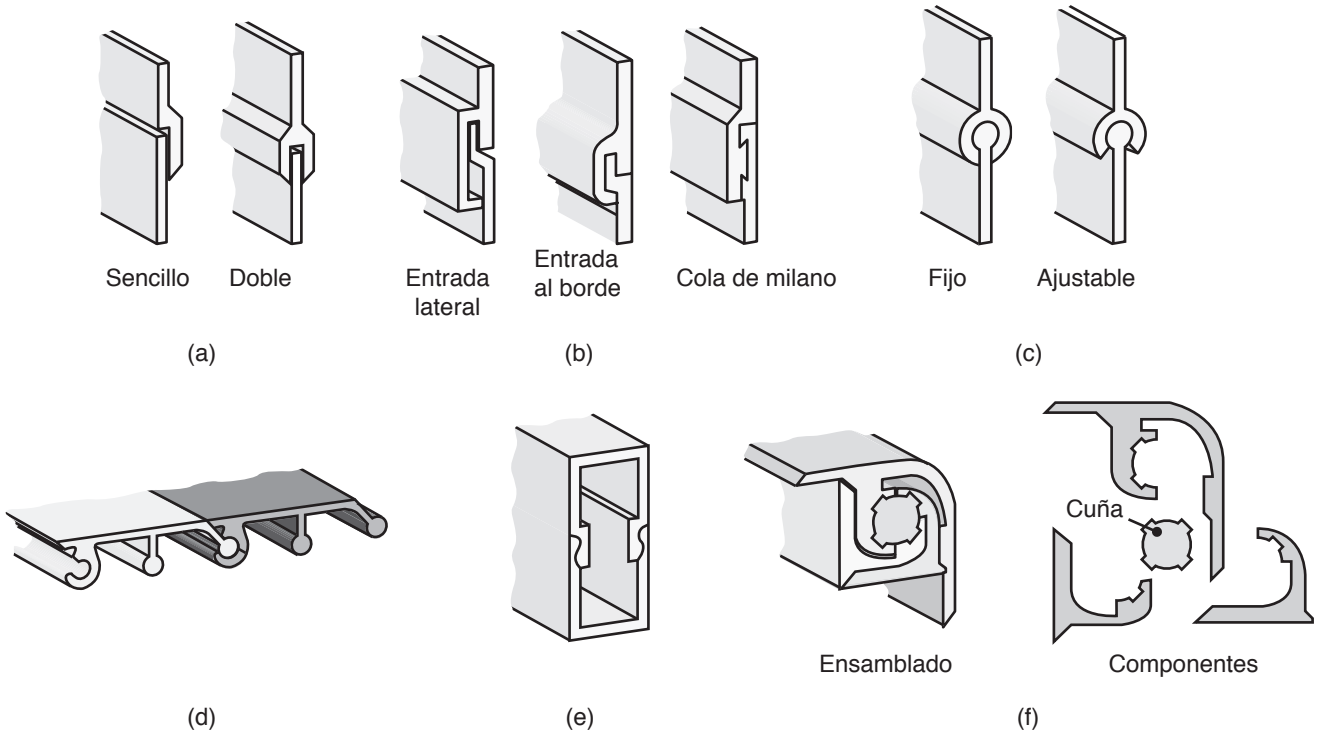


FIGURA 15.18 Ejemplos de geometrías de pieza que permiten el ensamble de secciones extruidas. (a) Juntas empalmadas; (b) juntas de empalme aseguradas; (c) ajustes deslizantes cilíndricos; (d) juntas deslizantes cilíndricas aseguradas; (e) ajuste de encaje y (f) ensamble con cuña.

jala el material a través del dado. Los productos de barra y alambrón 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.

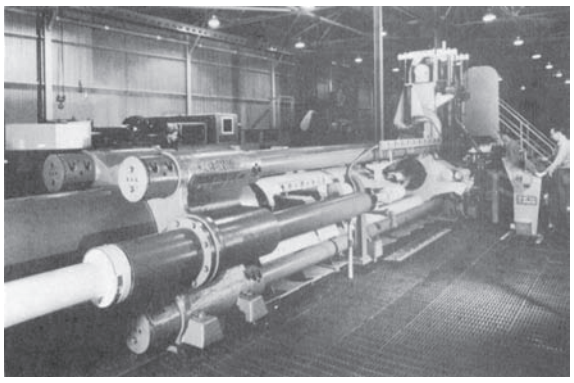


FIGURA 15.19 Vista general de una prensa de extrusión hidráulica de 9 MN (1000 ton). *Fuente:* Cortesía de Jones & Laughlin Steel Corporation.

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

$$F = Y_{\text{prom}} A_f \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right), \tag{15.4}$$

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

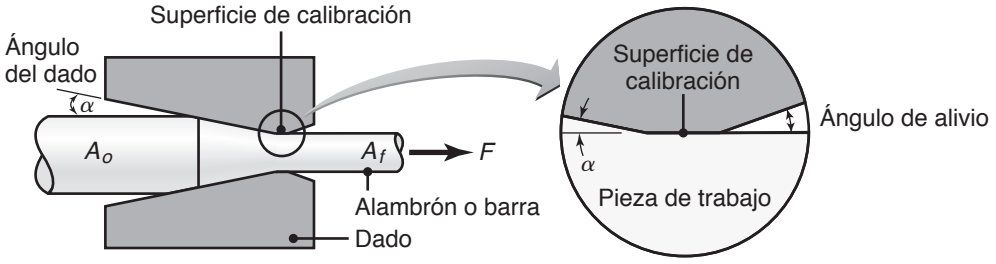


FIGURA 15.20 Variables del proceso durante el trefilado; el ángulo del dado, la reducción del área de la sección transversal por pasada, la velocidad de trefilado, la temperatura y la condición de lubricación afectan la fuerza de trefilado, *F*.

$$F = Y_{\text{prom}} A_f \left[\left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right) + \frac{2}{3} \alpha \right], \tag{15.5}$$

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-

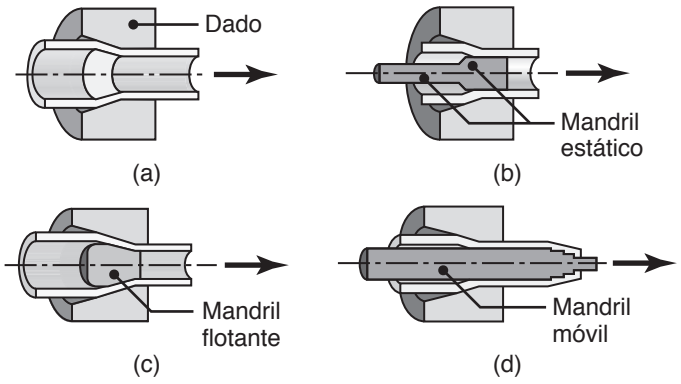


FIGURA 15.21 Ejemplos de operaciones para el trefilado de tubos, con y sin mandril interno; observe que es posible producir una gran variedad de diámetros y grosores de pared a partir del mismo material tubular inicial (el cual se ha fabricado mediante otros procesos).

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 alambrón 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 alambrón, 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 *manojo*. 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.

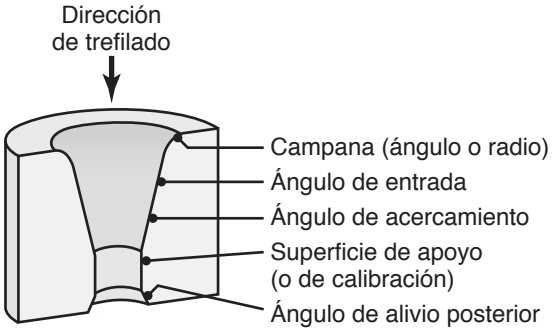


FIGURA 15.22 Terminología relacionada con un dado típico utilizado para trefilar una barra o un alambrón redondos.

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 *policristalina*, 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.

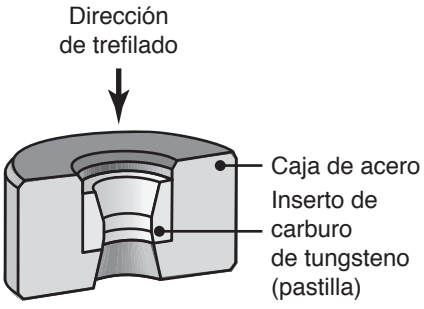


FIGURA 15.23 Dado con inserto de carburo de tungsteno en una caja de acero; los dados de diamante, que se utilizan en el trefilado de alambres delgados, se encajonan de manera similar.

- **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 arañazos 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 recalcado, 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

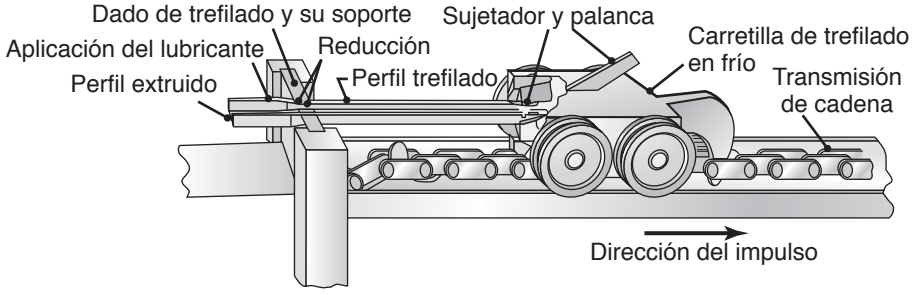


FIGURA 15.24 Trefilado en frío —sobre un banco de trefilado— de un canal extruido para reducir su sección transversal; mediante este procedimiento se trefilan longitudes individuales de barras rectas o de secciones transversales.

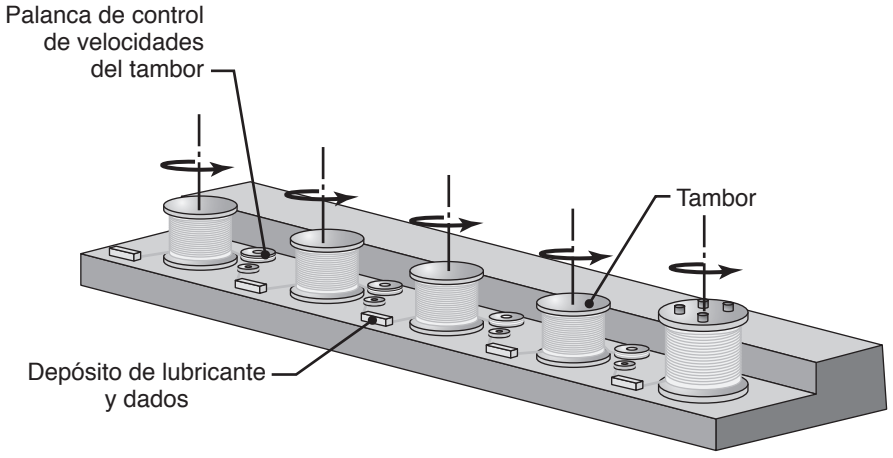


FIGURA 15.25 Ilustración de un trefilado de alambre en varias etapas que se utiliza comúnmente en la producción de hilo de cobre para alambrado eléctrico. Se muestra una configuración de cinco cabrestantes; las máquinas de trefilado pueden incorporar 15 o más de estos tambores, dependiendo del material 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
Agrietamiento por velocidad
Agrietamiento tipo "Chevron"
Agrietamiento tipo abeto
Alambre
Banco de trefilado
Barra
Cabeza de turco
Cabrestante
Carrete
Dado compuesto (ojo de buey)
Dado de araña
Dado de corte
Dado tipo puente
Defecto de bambú
Defecto de tubo
Defectos de extrusión
Encamisado
Enlatado
Extrusión
Extrusión constante
Extrusión en frío
Extrusión hidrostática
Extrusión por impacto
Pase de dimensionamiento
Patentado
Planchado
Proceso Séjournet
Recubrimiento de conversión
Relación de extrusión
Traslape (costura)
Trefilado
Trefilado múltiple
Zona muerta de metal

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 trefilado 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.

CAPÍTULO

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 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

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 derredor. 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 *prensas* (descritas en las secciones 14.8 y 16.15) utilizando un conjunto de dados. Una pieza de lámina metálica producida en prensas 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

(a) (b)

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-

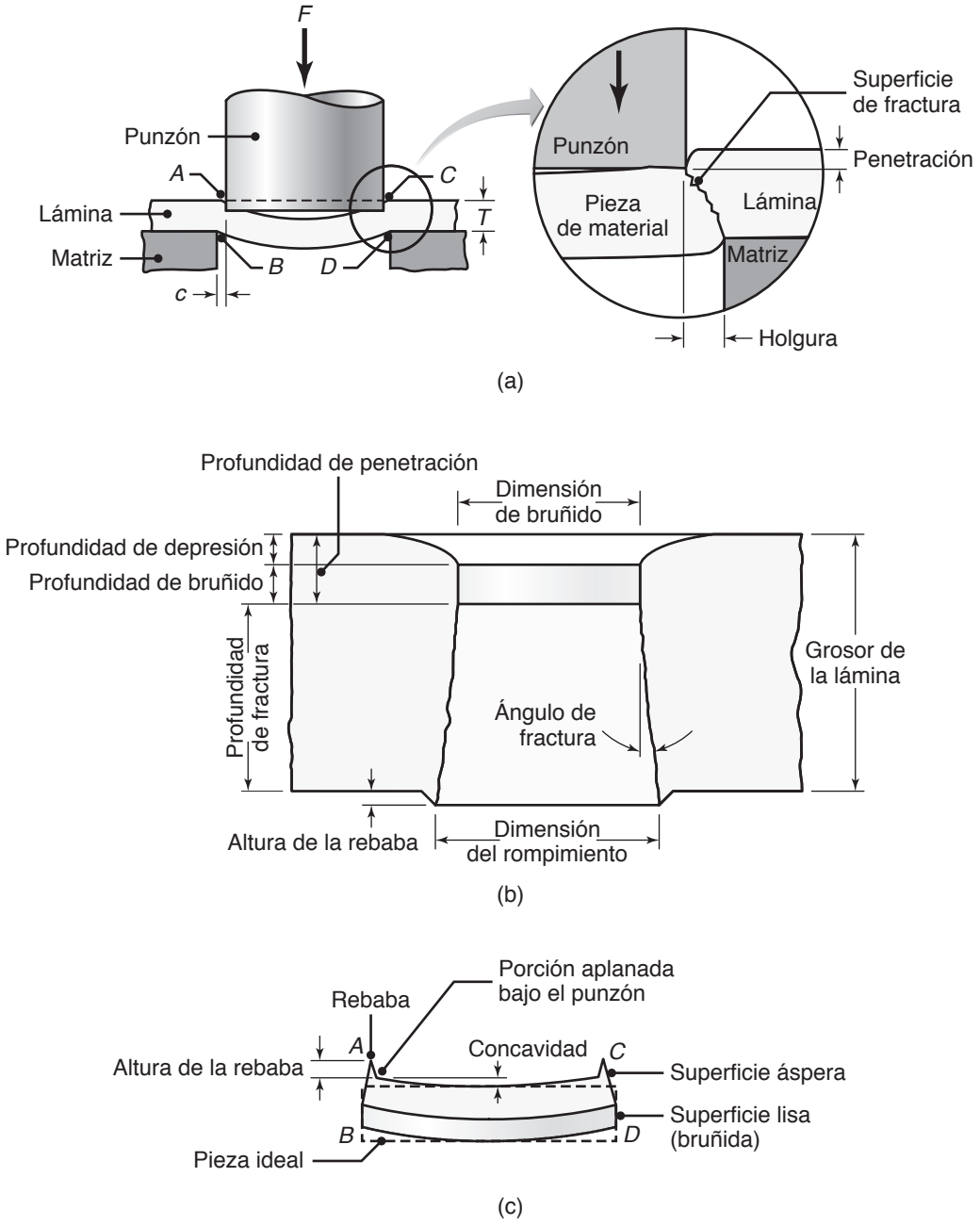


FIGURA 16.2 (a) Ilustración esquemática del cizallamiento con un punzón y una matriz o dado para indicar algunas de las variables del proceso. Rasgos característicos de (b) un orificio punzonado y (c) la pieza de material; note que las escalas de (b) y (c) son diferentes.

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**.

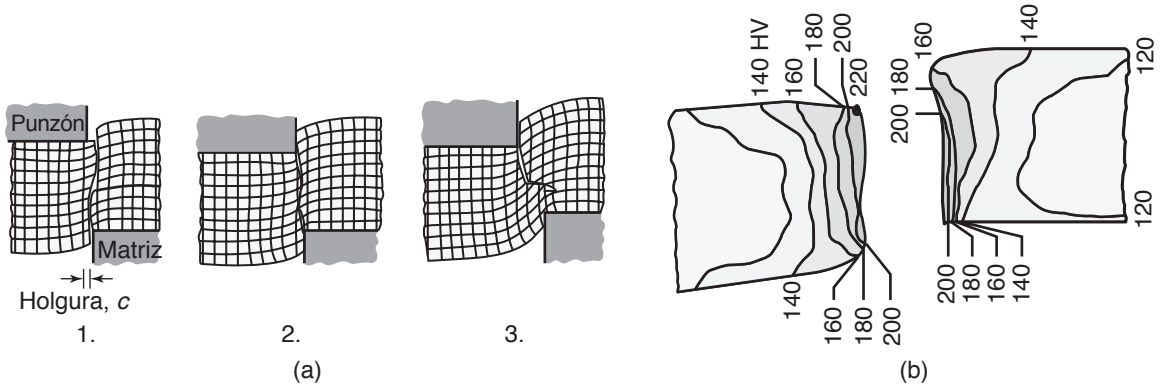


FIGURA 16.3 (a) Efecto de la holgura, *c*, entre el punzón y la matriz en la zona de deformación por cizallamiento; al aumentar la holgura, el material tiende a ser jalado hacia la matriz en lugar de ser cizallado. En la práctica, las holguras suelen oscilar entre 2 y 10% del grosor de la lámina. (b) 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

$$F = 0.7TL(\text{UTS}), \tag{16.1}$$

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-**

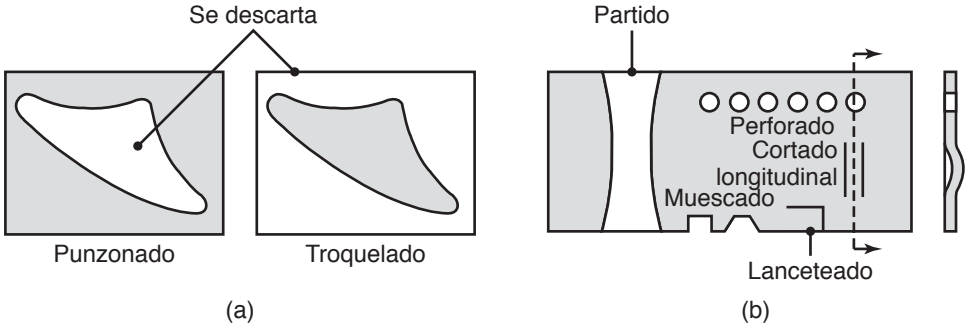


FIGURA 16.4 (a) Punzonado (perforación) y troquelado. (b) Ejemplos de diversas operaciones de troquelado sobre láminas metálicas; el lanceteado implica ranurar un corte longitudinal y doblar la lámina para formar una lengüeta o ceja.

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.

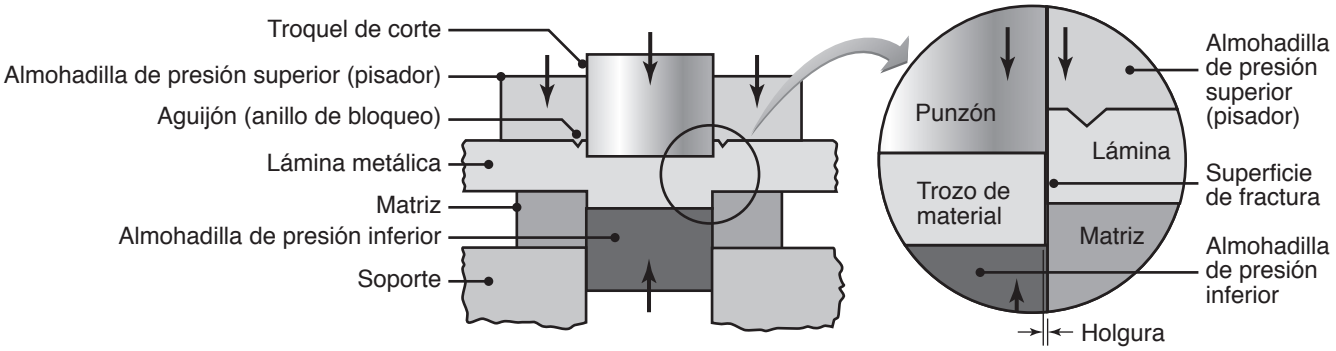
Troquelado fino. Los bordes cuadrados con superficies cortadas muy lisas pueden producirse por *troquelado fino* (figura 16.5a). En la figura 16.5b se muestra un diseño de troqueles básico. Un aguijón o anillo de bloqueo en forma de V bloquea mecánicamente la lámina firmemente en su lugar y, por lo tanto, 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 metalmecánica. En lo sucesivo se usará este término en este contexto.

(a)



(b)

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.

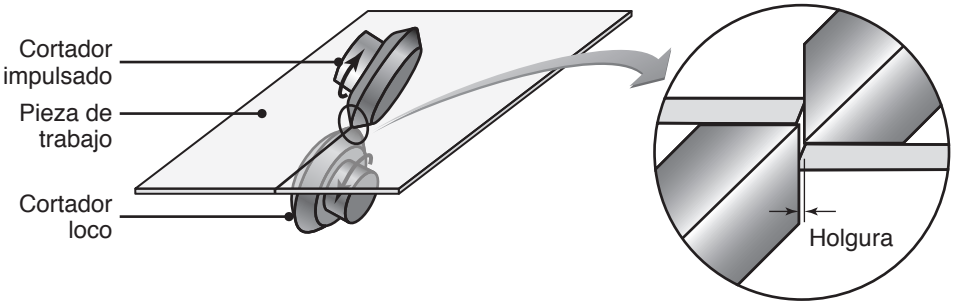


FIGURA 16.6 Cortado longitudinal con cuchillas giratorias, un proceso similar a la apertura de latas.

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

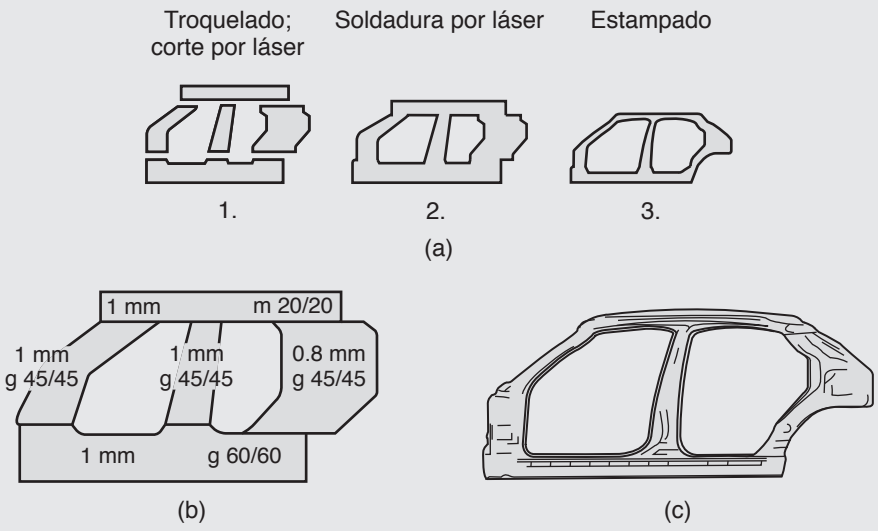
En la figura 16.7 se muestra un ejemplo de la utilización de láminas metálicas soldadas a la medida en carrocerías de automóvil. Note que al principio se cortan cinco formatos diferentes, incluyendo el corte por rayo láser. Cuatro de estas piezas tienen 1 mm de espesor y el grosor de la otra es de 0.8 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/m^2.
m 20/20	Lámina de acero electrodepositada con doble capa de una aleación de hierro-zinc. Cantidad de zinc 20/20 g/m^2.

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.

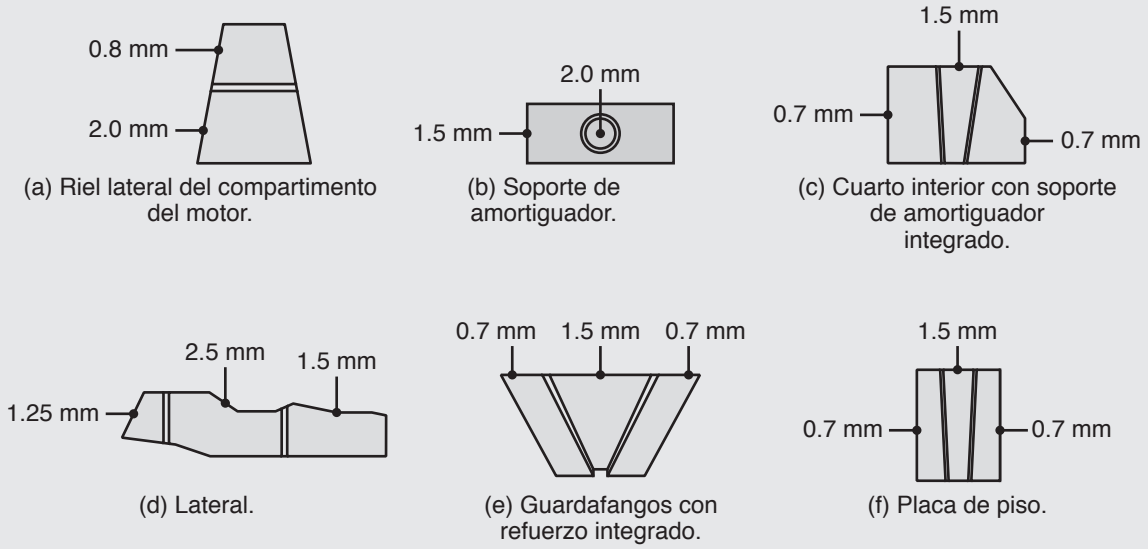


FIGURA 16.8 Ejemplos de componentes de una carrocería automotriz estampados y soldados a tope con láser. *Fuente:* Según M. Geiger y T. Nakagawa.

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.

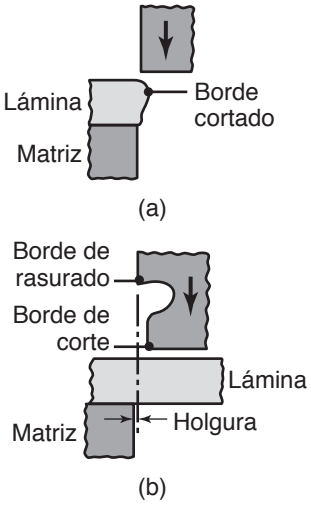


FIGURA 16.9 Ilustraciones esquemáticas del proceso de rasurado. (a) Rasurado de un borde cortado. (b) Combinación de corte y rasurado en una sola carrera.

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.

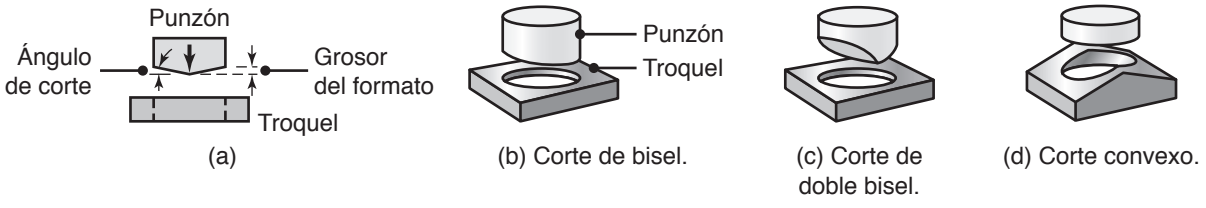


FIGURA 16.10 Ejemplos de ángulos de corte en punzones y matrices.

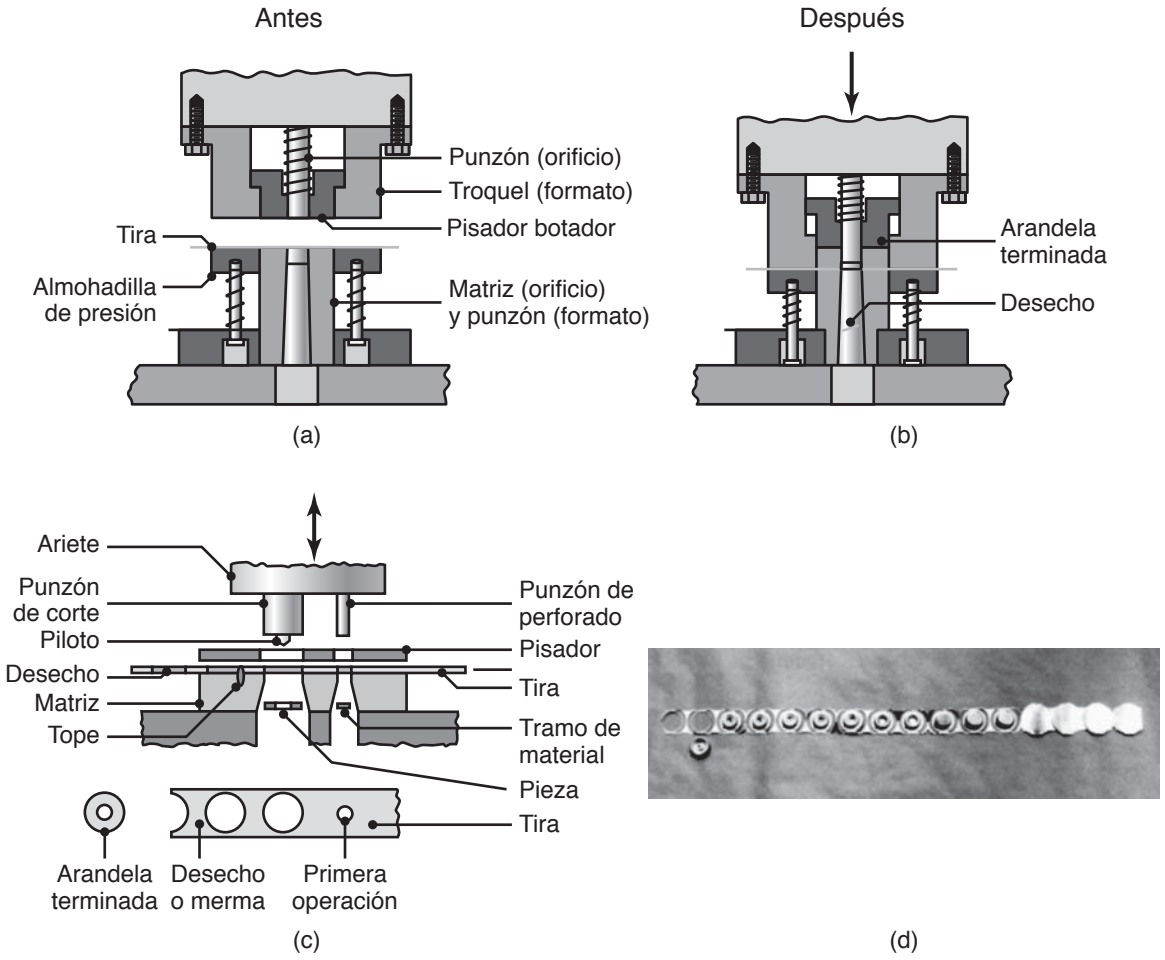


FIGURA 16.11 Ilustraciones esquemáticas (a) antes y (b) después del troquelado de una arandela común en un troquel compuesto; observe los movimientos independientes del troquel (para hacer el corte) y el punzón (para realizar el orificio en la arandela). (c) Ilustración esquemática de la fabricación 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.

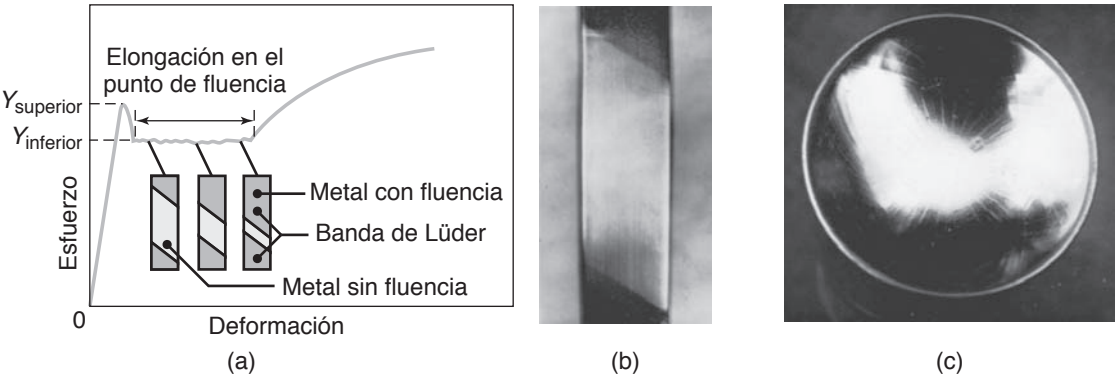


FIGURA 16.12 (a) Elongación hasta el punto de fluencia en una probeta de lámina metálica. (b) Bandas de Lüder en una lámina de acero al bajo carbono. (c) Deformaciones por estiramiento en la parte inferior de una lata de acero para envasar productos del hogar. *Fuente:* (b) Cortesía de Caterpillar, Inc.

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

$$\text{Resistencia a la abolladura} = \frac{Y^2T^4}{S}, \tag{16.2a}$$

donde S es la rigidez del panel, que a su vez se define como

$$S = ET^a(\text{forma}), \tag{16.2b}$$

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

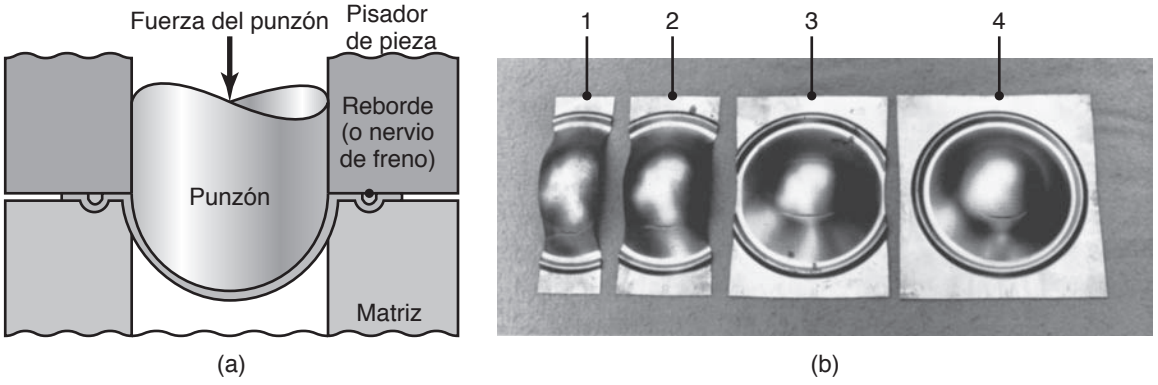


FIGURA 16.13 (a) Prueba de acopamiento (prueba de Erichsen) para determinar la formabilidad de láminas metálicas. (b) Resultados de pruebas de abombamiento en láminas de acero con diferentes anchuras; la muestra situada más a la izquierda está sometida, básicamente, a tensión simple. La muestra que se 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,

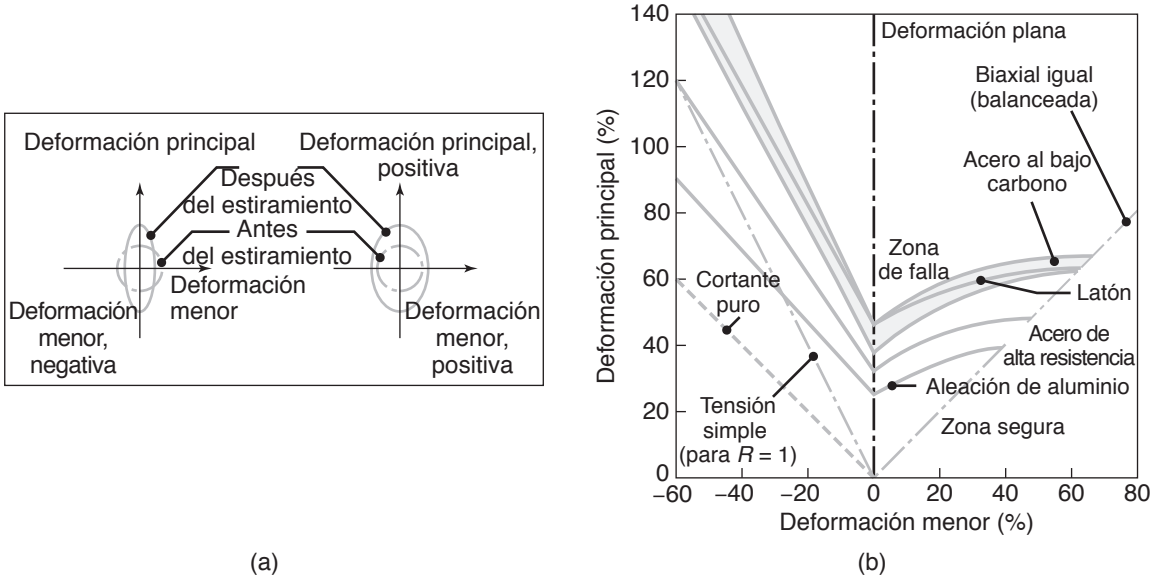


FIGURA 16.14 (a) Medidas de deformación en patrones de rejilla circular. (b) Diagramas de límite de formado (FLD) para diversas láminas metálicas. Aunque la deformación principal siempre es positiva (estiramiento), la deformación menor puede ser positiva o negativa. *R* es la anisotropía normal de la 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.

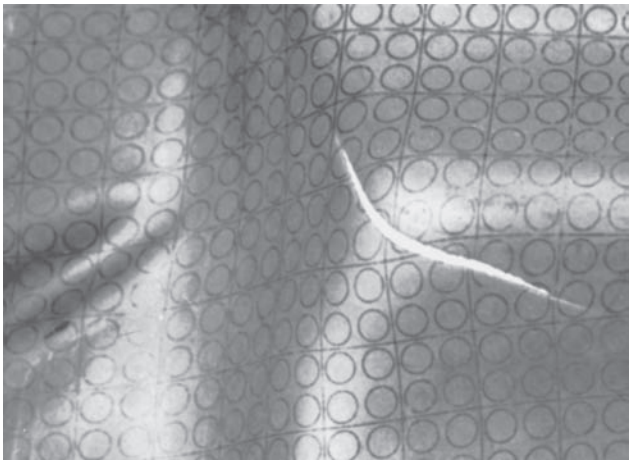


FIGURA 16.15 Deformación del patrón de rejilla y rasgamiento de la lámina de metal durante el formado; los ejes mayor y menor de los círculos se utilizan para determinar las coordenadas en el diagrama de límite de formado que se muestra en la figura 16.14b. *Fuente:* Según S. P. Keeler.

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

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 interfases 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.

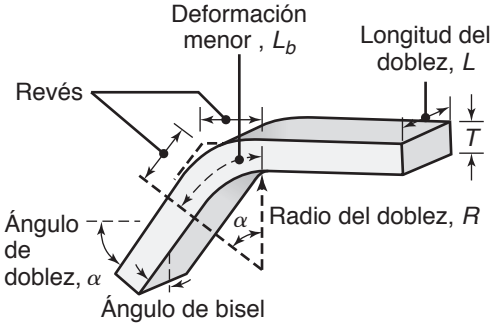


FIGURA 16.16 Terminología del doblado; note que el radio del doblez se mide en la superficie interior de la pieza doblada.

16.5 Doblado de láminas, placas y tubos

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 doblez*, 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

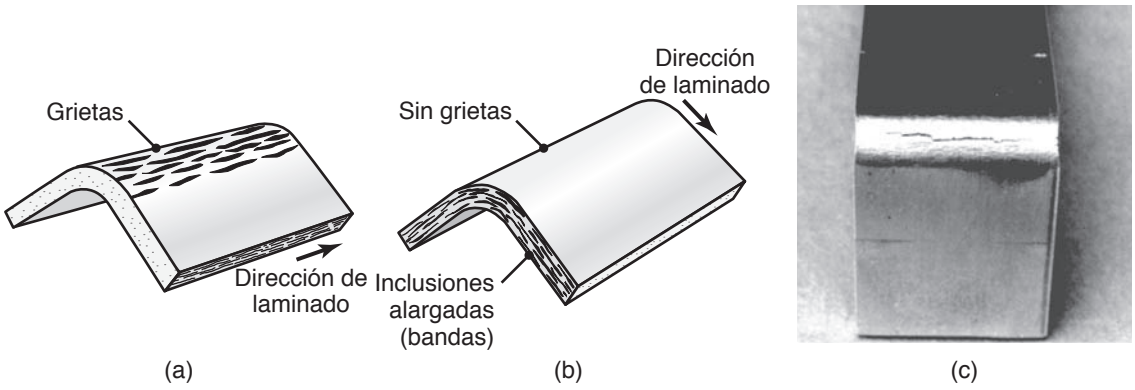


FIGURA 16.17 (a) y (b) Efecto de las inclusiones alargadas (bandas) en la formación de grietas según la dirección de doblado con respecto a la dirección del laminado original de la lámina. (c) Grietas en la superficie exterior de una tira de aluminio doblada a un ángulo de 90°. Observe también el estrechamiento 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:

$$L_b = \alpha(R + kT), \tag{16.3a}$$

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,

$$L_b = \alpha\left[R + \left(\frac{T}{2}\right)\right]. \tag{16.3b}$$

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

$$e = \frac{1}{(2R/T)+1}. \tag{16.4}$$

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

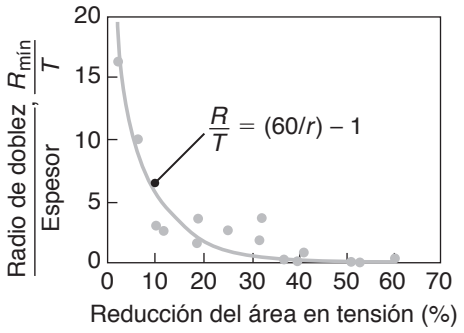


FIGURA 16.18 Relación entre $R_{mín}/T$ y la reducción de la tensión del área para los metales laminados. Observe que la lámina metálica con una reducción del área en tensión del 50% puede doblarse sobre sí misma, en un proceso parecido al plegado de una lámina de papel, sin agrietarse. *Fuente:* Según 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 doblez mínimo*, $R_{mín}$, es, aproximadamente,

$$R_{mín} = T\left(\frac{50}{r} - 1\right). \tag{16.5}$$

Por lo tanto, para $r = 50$, el radio de doblez 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 doblez final de una lámina metálica después de la restitución es menor que el ángulo al que se dobla la lámina, y el radio de doblez 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

$$\frac{R_i}{R_f} = 4\left(\frac{R_i Y}{ET}\right)^3 - 3\left(\frac{R_i Y}{ET}\right) + 1. \tag{16.6}$$

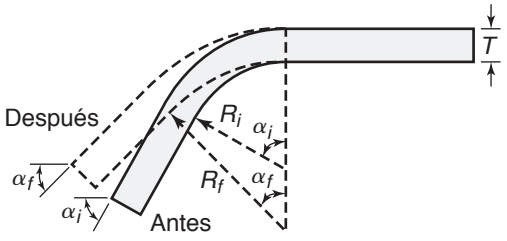


FIGURA 16.19 Restitución en flexión; la pieza tiende a recuperarse elásticamente después de ser doblada y su radio de doblez se hace más grande. Bajo ciertas condiciones, es posible que el ángulo de doblez final sea más pequeño que el ángulo original (restitución negativa).

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.

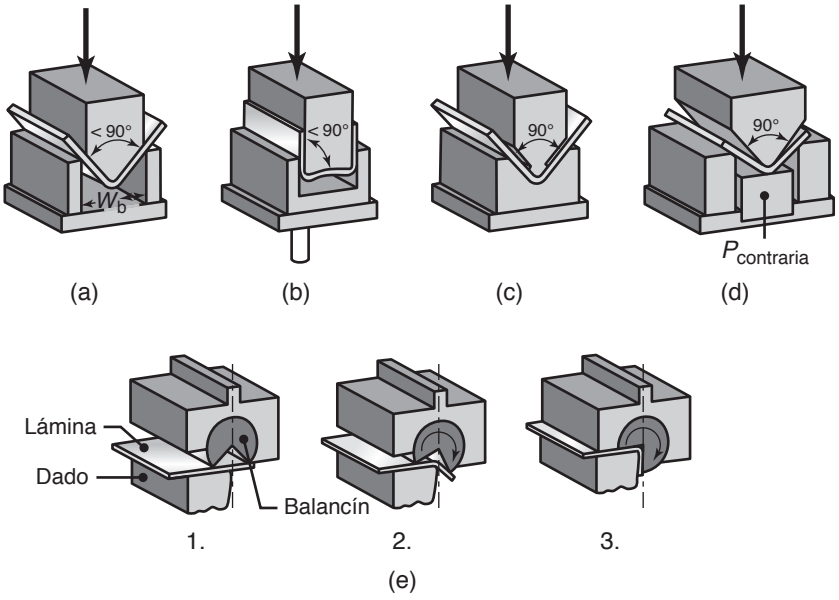


FIGURA 16.20 Métodos para reducir o eliminar la restitución en operaciones de doblado.

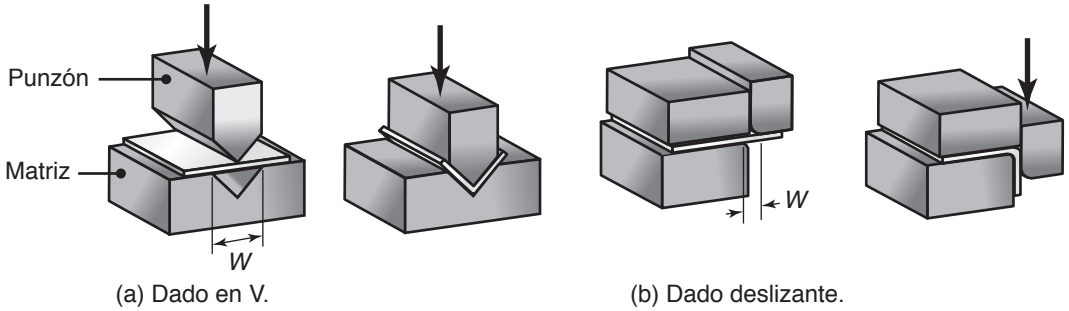


FIGURA 16.21 Operaciones comunes del doblado con dados que muestran la dimensión de la abertura del dado, W, utilizada en el cálculo de las fuerzas de doblado.

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 acuñar el área doblada sometiéndola 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 doblez, L, el espesor, T, de la lámina y la abertura del dado, W (vea la figura 16.21). Excluyendo la fricción, la *fuerza de doblez máxima*, P, es

$$P = \frac{kYLT^2}{W}, \tag{16.7}$$

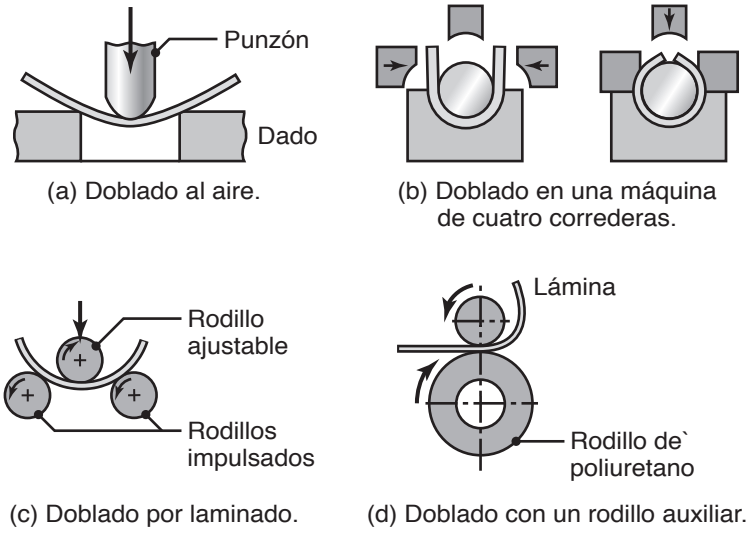


FIGURA 16.22 Ejemplos de diversas operaciones de doblado.

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.

$$P = \frac{(\text{UTS})LT^2}{W}, \tag{16.8}$$

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

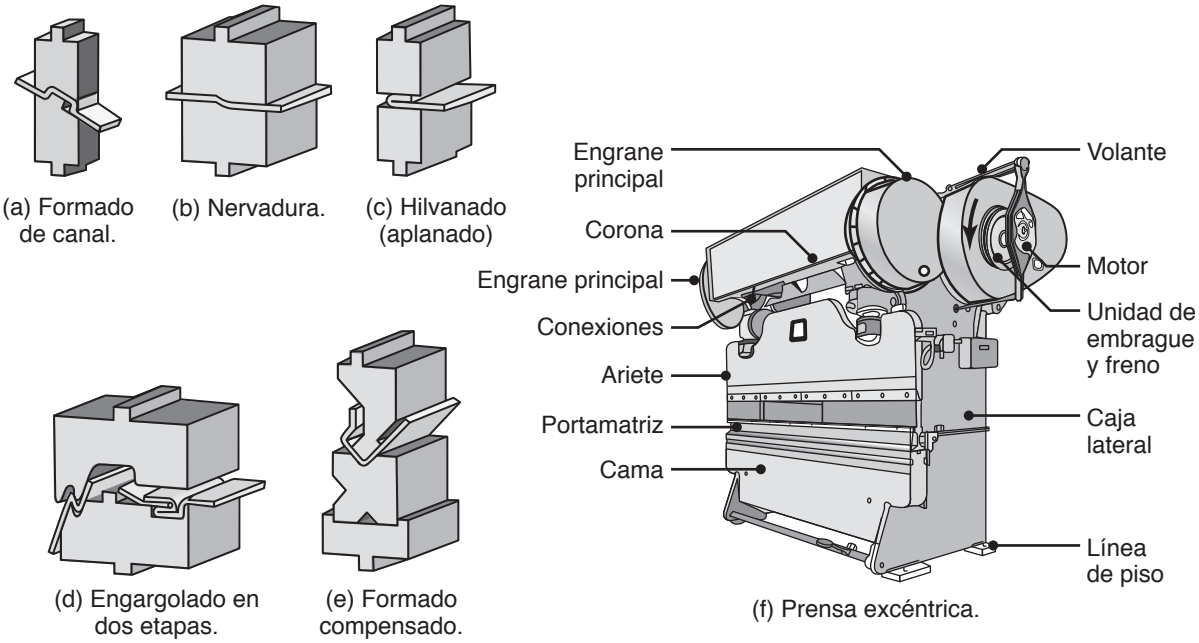


FIGURA 16.23 (a) a (e) Ilustraciones esquemáticas de diversas operaciones de doblado en una prensa excéntrica. (f) Ilustración esquemática de una prensa excéntrica. *Fuente:* Enprotech Industrial Technologies Inc.

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.

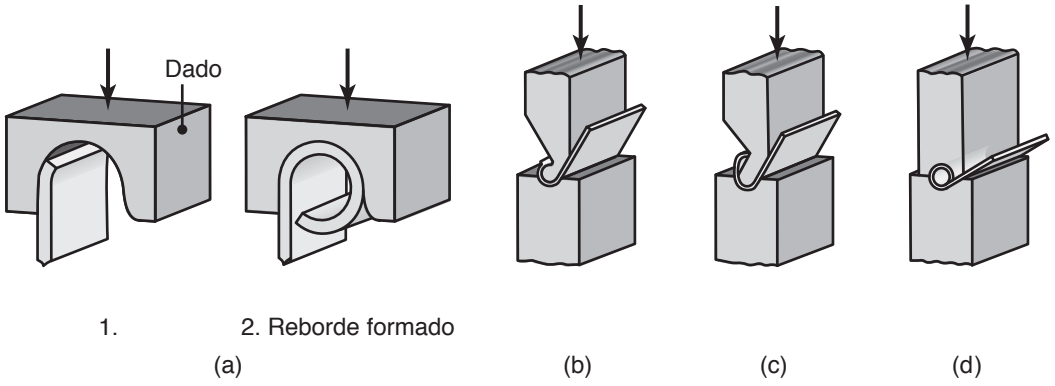


FIGURA 16.24 (a) Formado de rebordes con un solo dado. (b) a (d) Formado de rebordes con dos dados en una prensa excéntrica.

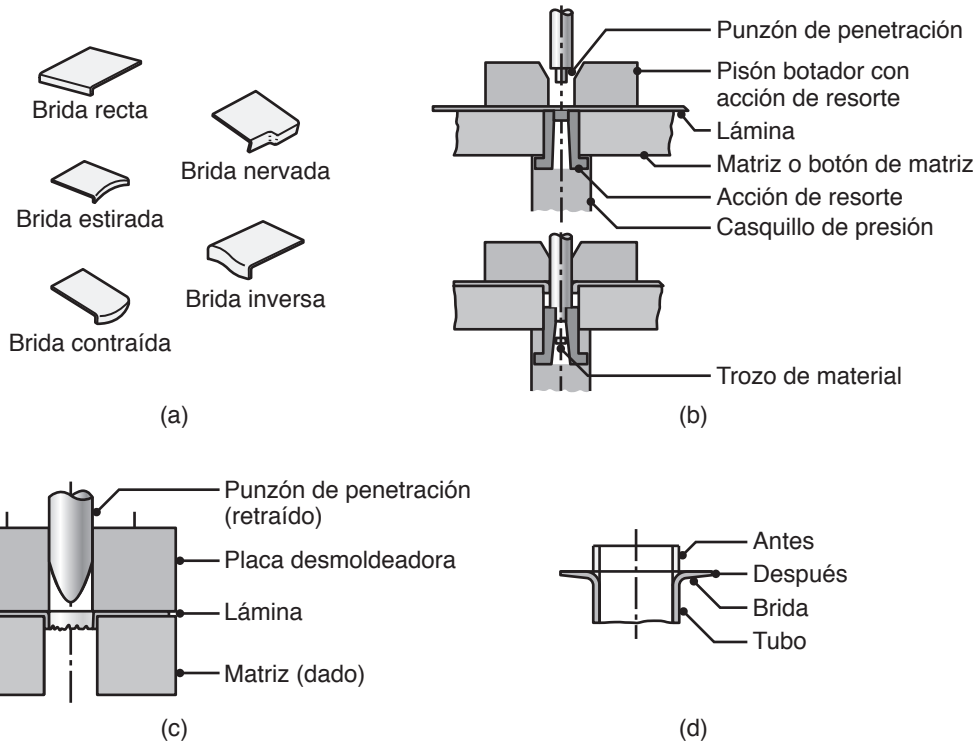


FIGURA 16.25 Diversas operaciones de bridado. (a) Bridas de lámina plana. (b) Horadado. (c) Perforación de lámina metálica para formar una brida. En esta operación, no es necesario perforar previamente un orificio antes del descenso del punzón; observe los bordes ásperos a lo largo de la circunferencia 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.

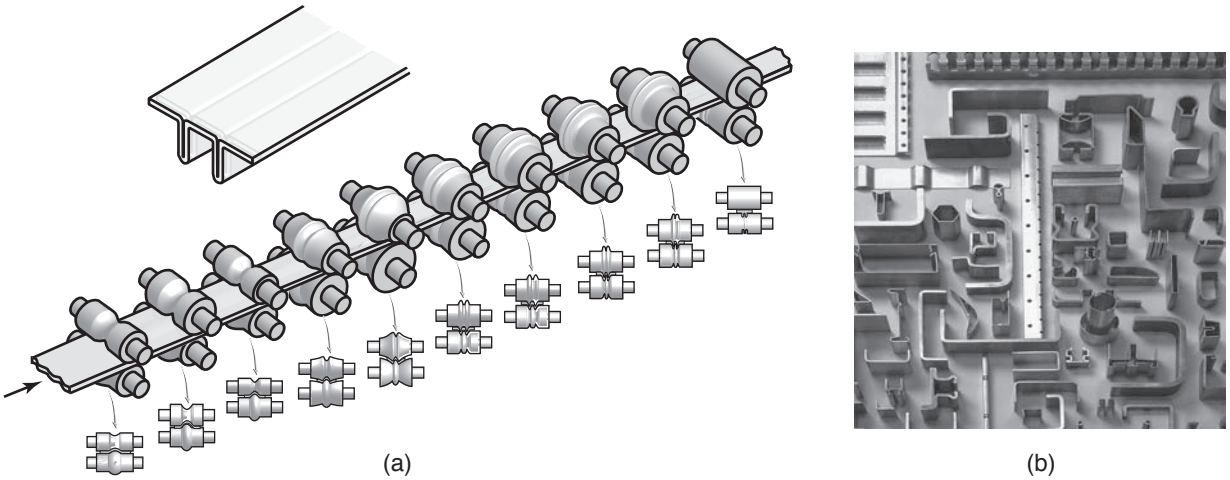


FIGURA 16.26 (a) Ilustración esquemática del proceso de formado con rodillos. (b) Ejemplos de secciones transversales formadas con rodillo. *Fuente:* (b) Cortesía de Sharon Custom Metal Forming, Inc.

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 embridarse 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 desgarre 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-

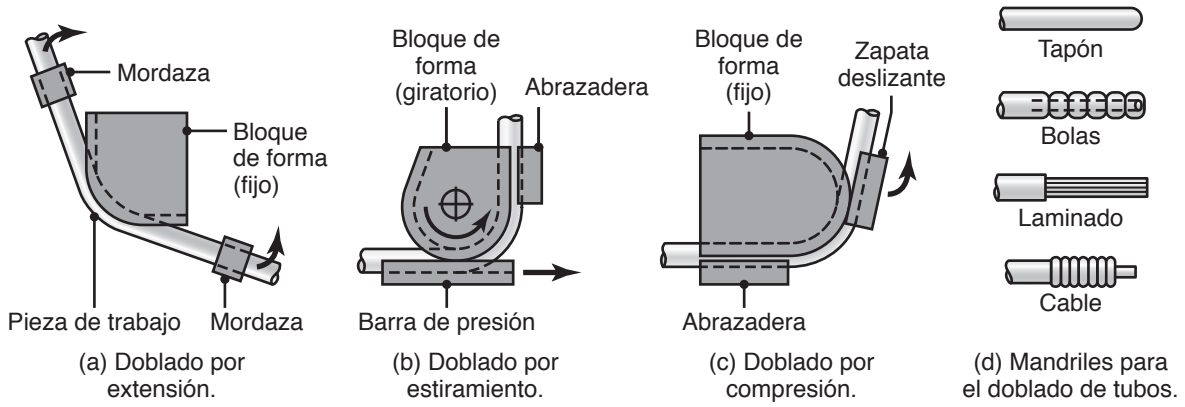


FIGURA 16.27 Métodos para el doblado de tubos. Con frecuencia, es necesario usar mandriles internos o rellenar los tubos con materiales en forma de partículas —como la arena— para evitar el colapso de la tubería durante el doblado. Los tubos también pueden doblarse mediante una técnica en la que un resorte 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 doblez es uniforme.

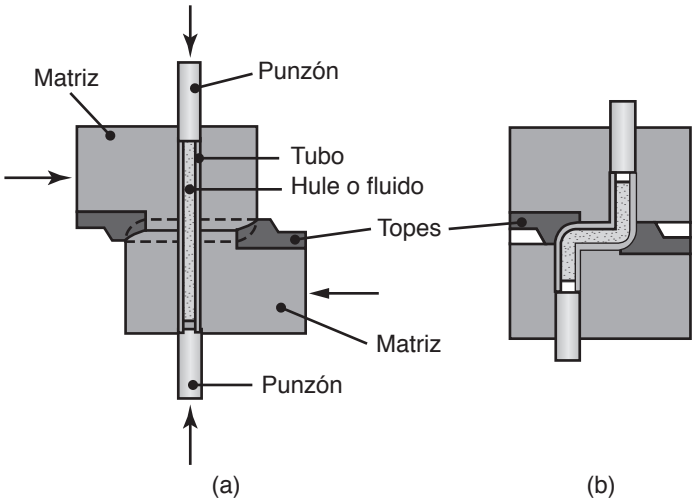


FIGURA 16.28 Método para formar un tubo con ángulos agudos aplicando una fuerza de compresión axial; los esfuerzos de compresión son benéficos en las operaciones de formado porque retrasan la fractura. Observe que el tubo está soportado internamente con hule o fluidos para evitar su colapso durante el 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.

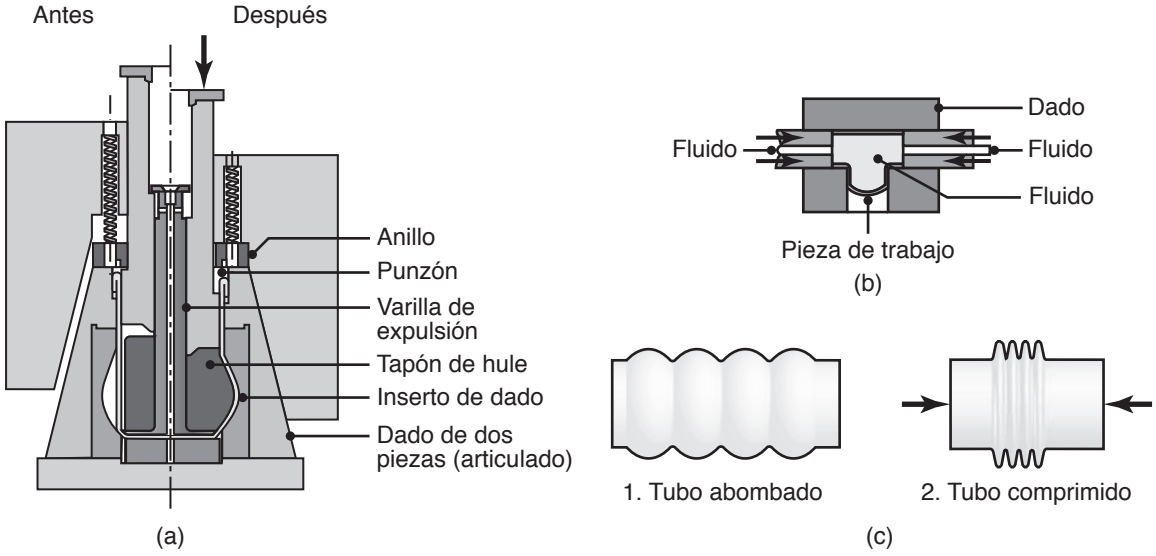


FIGURA 16.29 (a) Abombamiento de una pieza tubular con un tapón flexible; con este método pueden hacerse dispensadores de agua. (b) Producción de accesorios para tuberías mediante la expansión de piezas tubulares bajo presión interna; después se punzona la parte inferior de la pieza para producir una "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.

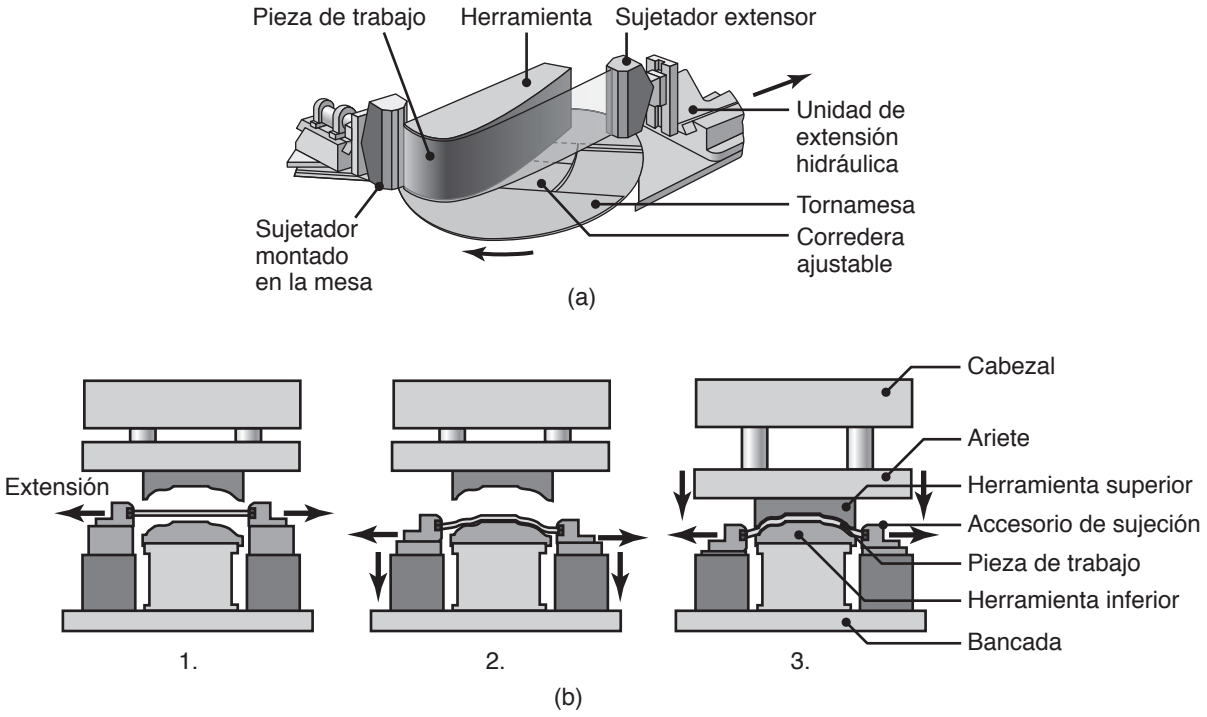


FIGURA 16.30 Ilustración esquemática de un proceso de formado por extensión; con este método pueden hacerse paneles de aluminio para aviones. *Fuente:* (a) Cortesía de Cyril Bath Co.

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_d; (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

$$F_{\text{máx}} = \pi D_p T(\text{UTS})\left[\left(\frac{D_o}{D_p}\right) - 0.7\right], \tag{16.9}$$

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.

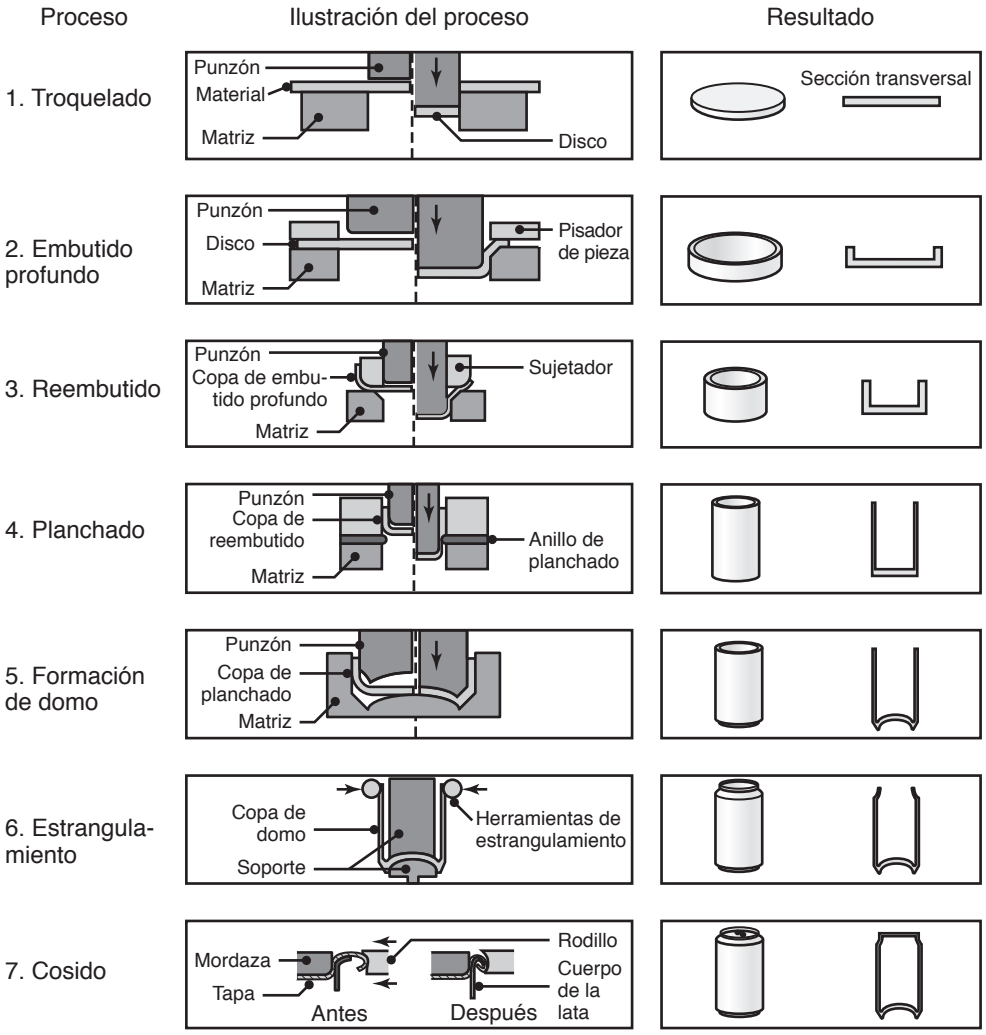


FIGURA 16.31 Procesos para el formado de metales empleados en la manufactura de latas de aluminio para envasar bebidas y hechas en dos piezas.

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

$$\text{LDR} = \frac{\text{Diámetro máximo de la pieza en bruto}}{\text{Diámetro del punzón}} = \frac{D_o}{D_p}. \qquad (16.10)$$

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

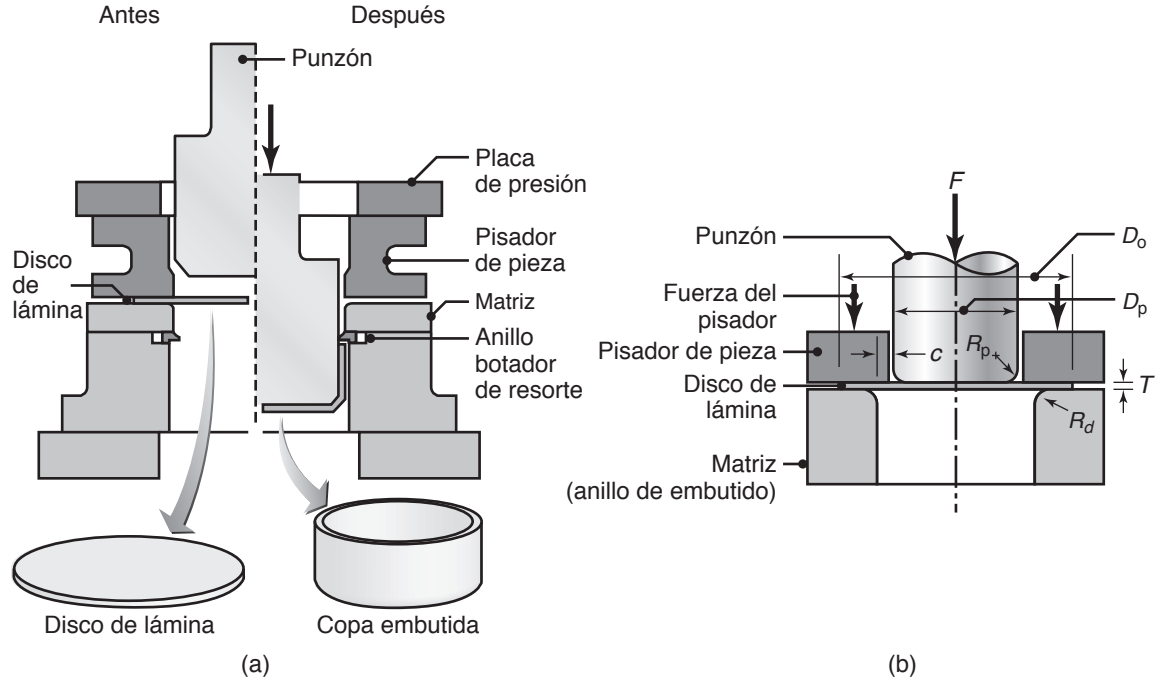


FIGURA 16.32 (a) Representación esquemática del proceso de embutido profundo en un disco de lámina metálica; el anillo botador facilita el retiro de la copa formada en la matriz. (b) Variables del proceso de embutido profundo. Exceptuando la fuerza del punzón, *F*, todos los parámetros indicados en la figura son variables independientes.

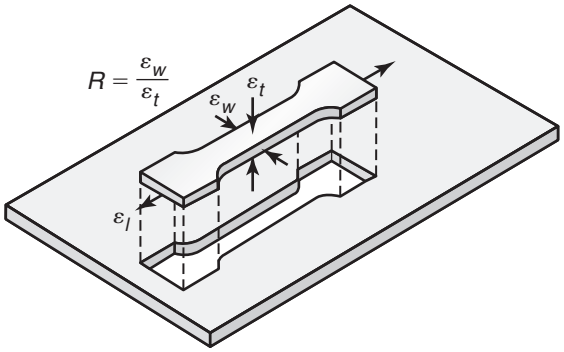


FIGURA 16.33 Deformaciones en una muestra para pruebas de tensión recortada a partir de una pieza de lámina metálica; estas deformaciones se utilizan para determinar la anisotropía normal y plana de la lámina metálica.

normal se define en términos de las deformaciones reales que experimenta una muestra para pruebas a tensión (figura 16.33):

$$R = \frac{\text{Deformación de anchura}}{\text{Deformación de espesor}} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t}. \qquad (16.11)$$

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

$$R_{prom} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4}, \qquad (16.12)$$

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

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2}. \qquad (16.13)$$

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.

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

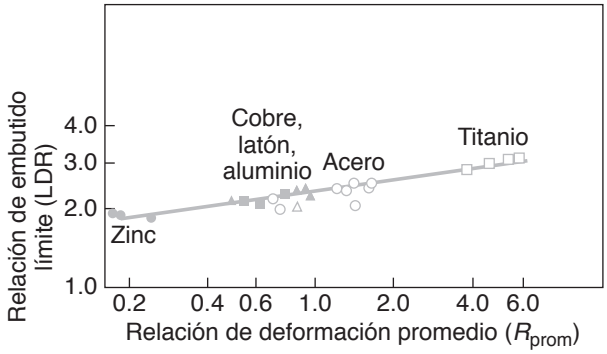


FIGURA 16.34 Relación entre la anisotropía normal promedio y la relación de embutido límite para diversos metales laminados. *Fuente:* Según M. Atkinson.

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

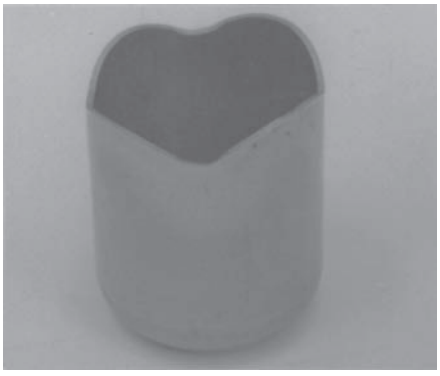


FIGURA 16.35 Bordes ondulados en una copa de acero embutido causados por la anisotropía planar de la lámina metálica.

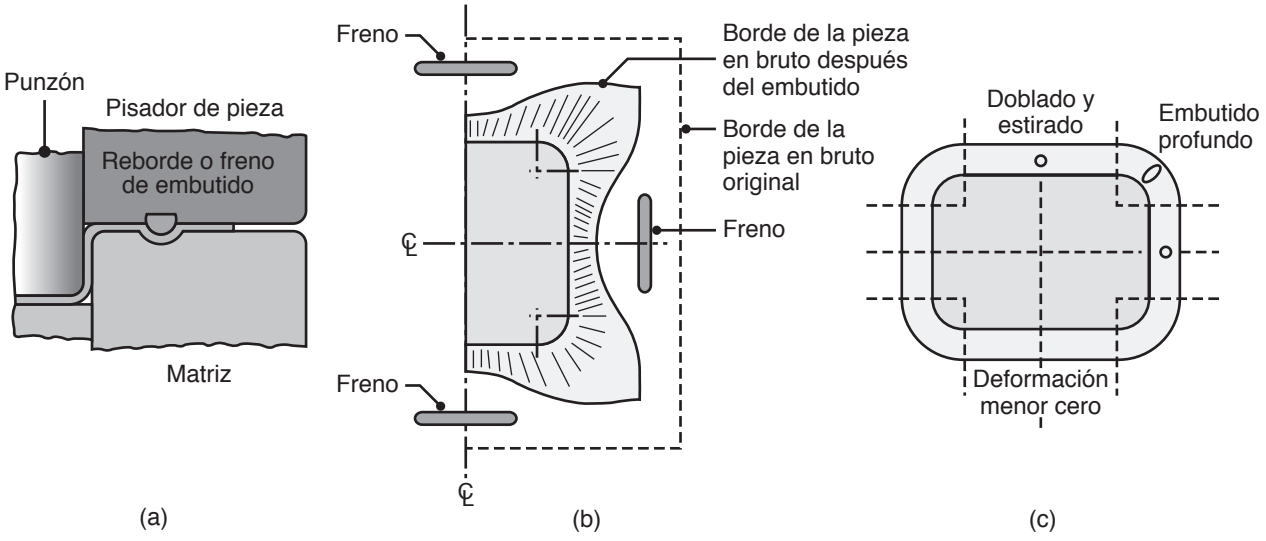


FIGURA 16.36 (a) Ilustración esquemática de un freno de embutido. (b) Flujo del metal durante el embutido de una pieza en forma de caja mientras se usan frenos para controlar el movimiento del material. (c) Deformación de rejillas circulares en la brida durante el embutido profundo.

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.

Reembutido. Los contenedores que son demasiado difíciles de embutir en una sola operación, generalmente se someten a un *reembutido* (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 *reembutido 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.

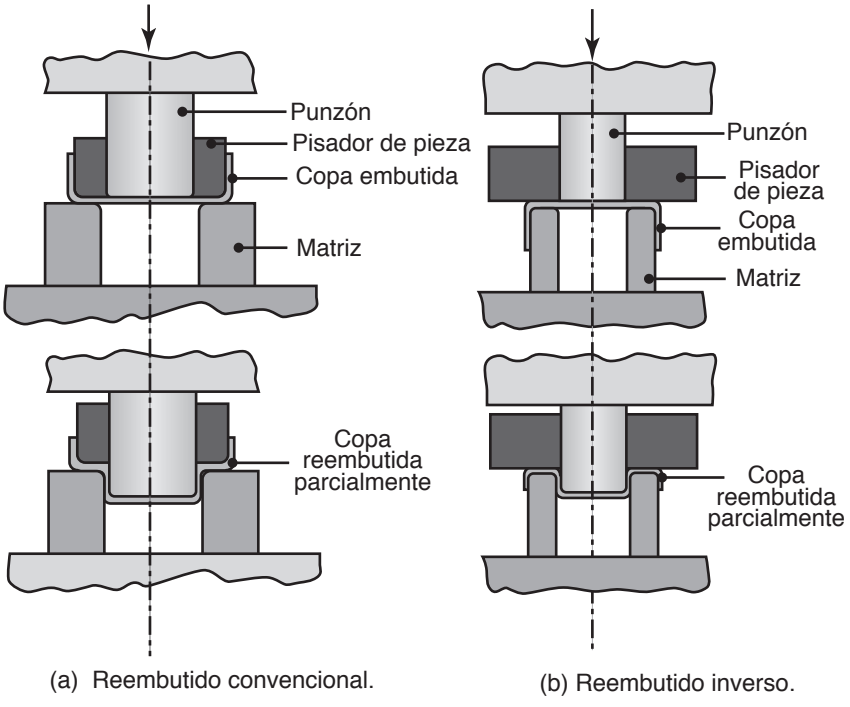


FIGURA 16.37 Reducción del diámetro de copas embutidas mediante operaciones de reembutido: (a) reembutido convencional y (b) reembutido inverso. Los contenedores profundos de diámetro pequeño pueden someterse a varias operaciones de reembutido.

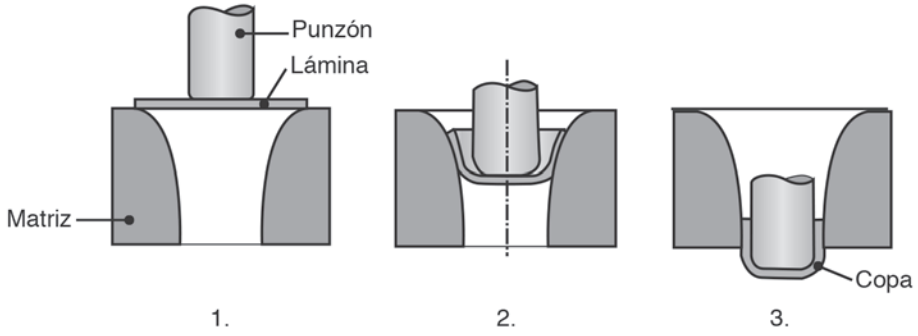


FIGURA 16.38 Etapas del embutido profundo sin pisador usando un perfil de matriz *tractriz*.

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:

$$D_o - D_p < 5T, \tag{16.14}$$

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

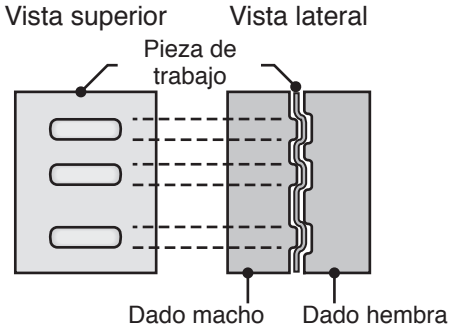


FIGURA 16.39 Operación de realzado con dos dados; mediante este proceso, pueden producirse letras, números y diseños en piezas de lámina metálica.

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*)

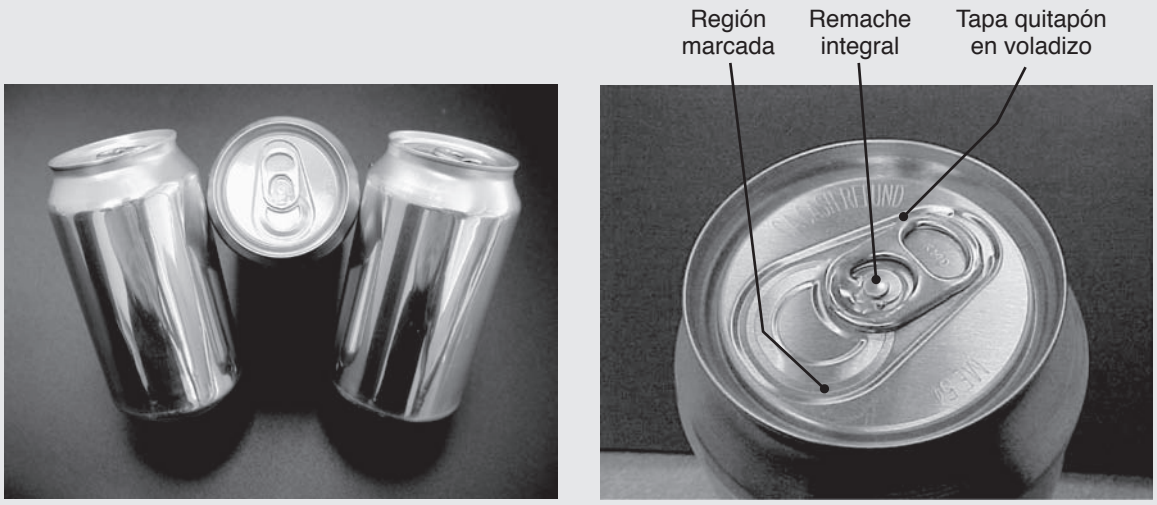


FIGURA 16.40 (a) Latas de aluminio para bebidas, note la superficie lisa. (b) Detalle de la tapa de la lata que muestra el remache integral y los bordes marcados en la tapa abatible.

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.

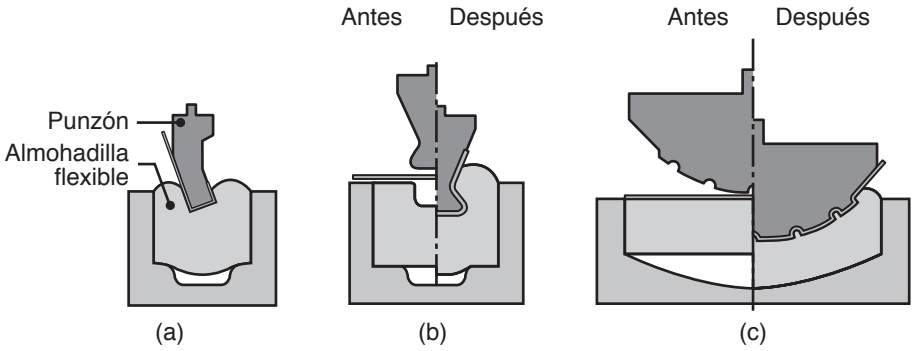


FIGURA 16.41 Ejemplos de doblado y realzado de láminas metálicas con un punzón de metal y una almohadilla flexible que sirve como dado hembra. *Fuente:* Cortesía de Polyurethane Products Corporation.

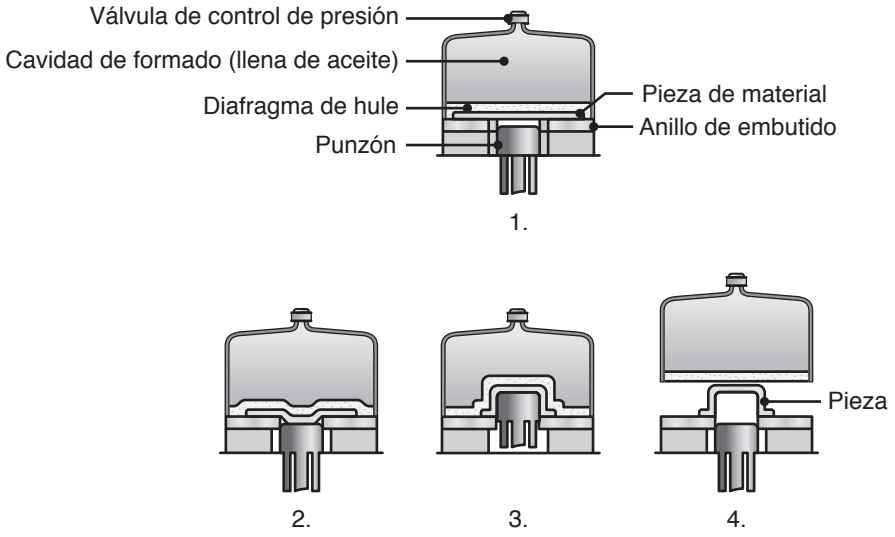


FIGURA 16.42 Proceso de hidroformado (o formado con fluidos); observe que, a diferencia del proceso de embutido profundo ordinario, la presión ejercida en el domo fuerza las paredes de la copa contra el punzón. La copa viaja con el punzón; de esta manera, se mejora la capacidad de embutido profundo.

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.

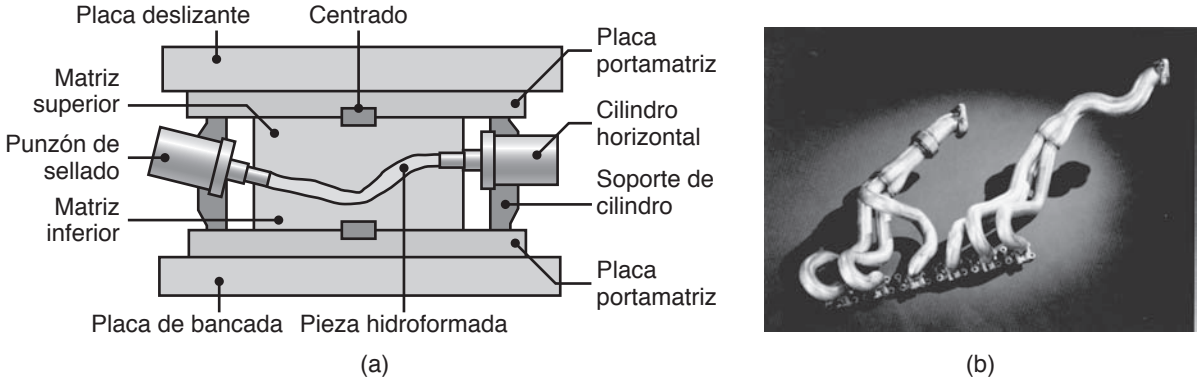


FIGURA 16.43 (a) Ilustración esquemática del proceso de hidroformado de tubos. (b) Ejemplo de piezas tubulares hidroformadas. A través del hidroformado de tubos, se producen componentes automotrices de escape y estructurales, cuadros de bicicleta y accesorios hidráulicos y neumáticos. *Fuente:* Cortesía 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.

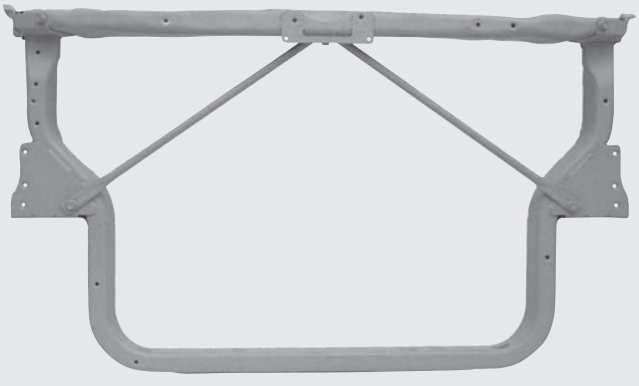


FIGURA 16.44 Hidroformado de un soporte de radiador automotriz que sirve como marco para el montaje del radiador.

(*continúa*)

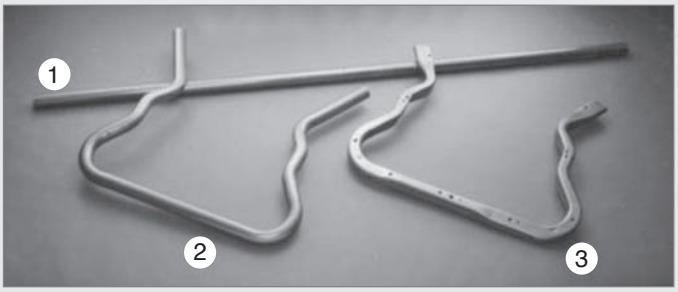


FIGURA 16.45 Secuencia de operaciones en la producción de un componente de tubo hidroformado: (1) tubo cortado a la longitud deseada; (2) tubo después del doblado y (3) tubo después del hidroformado.

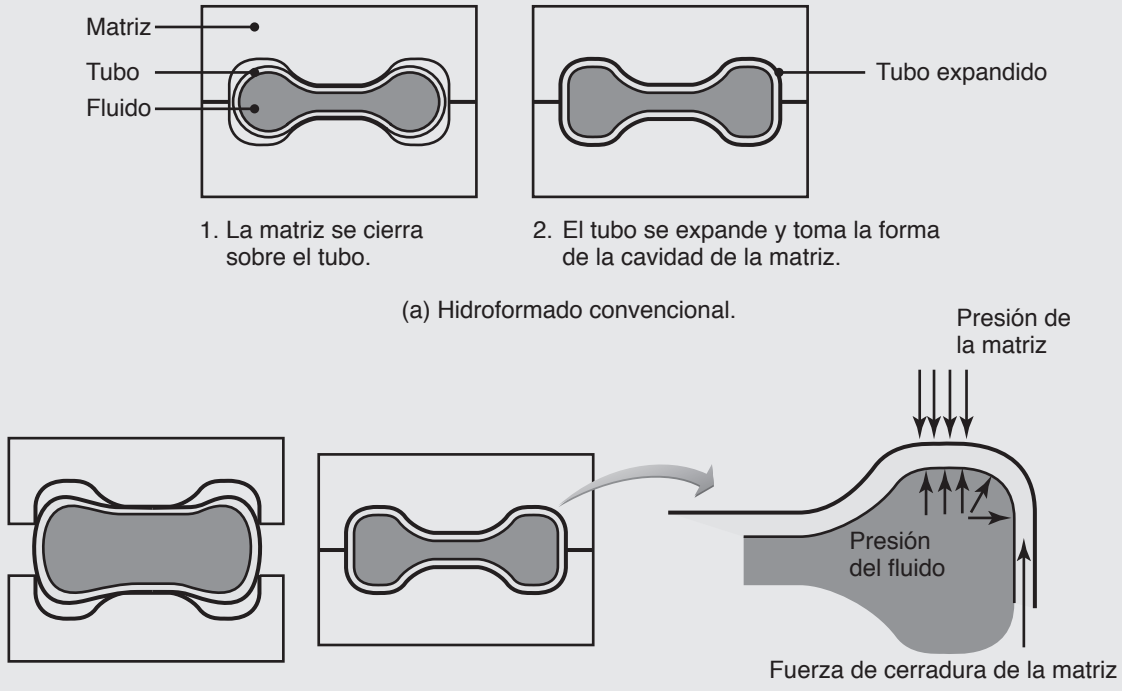


FIGURA 16.46 Ilustración esquemática de la expansión de un tubo hasta una sección transversal deseada mediante (a) el hidroformado convencional y (b) el hidroformado por secuencia de presión.

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

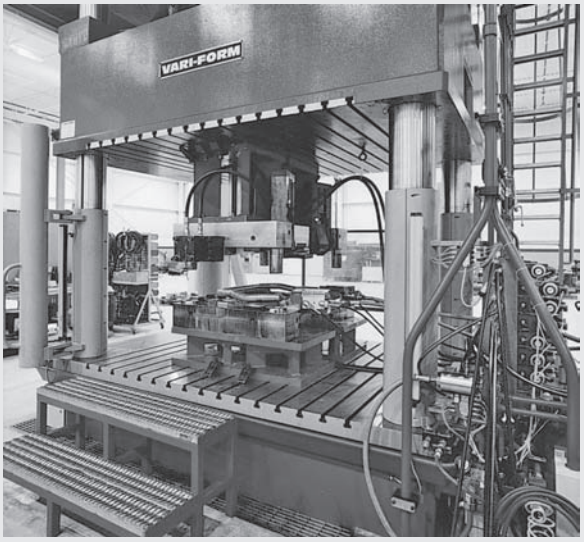


FIGURA 16.47 Vista de una prensa para hidroformado de tubos con el tubo doblado en posición mediante una matriz de formado.

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

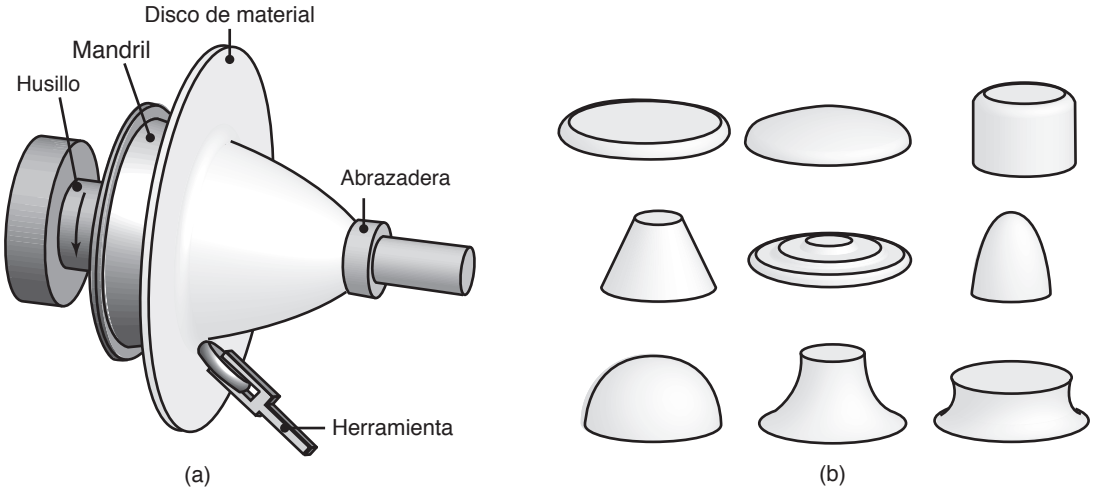


FIGURA 16.48 (a) Ilustración esquemática del proceso de rechazado convencional. (b) Tipos de piezas rechazadas convencionalmente. Todas las piezas son axisimétricas.

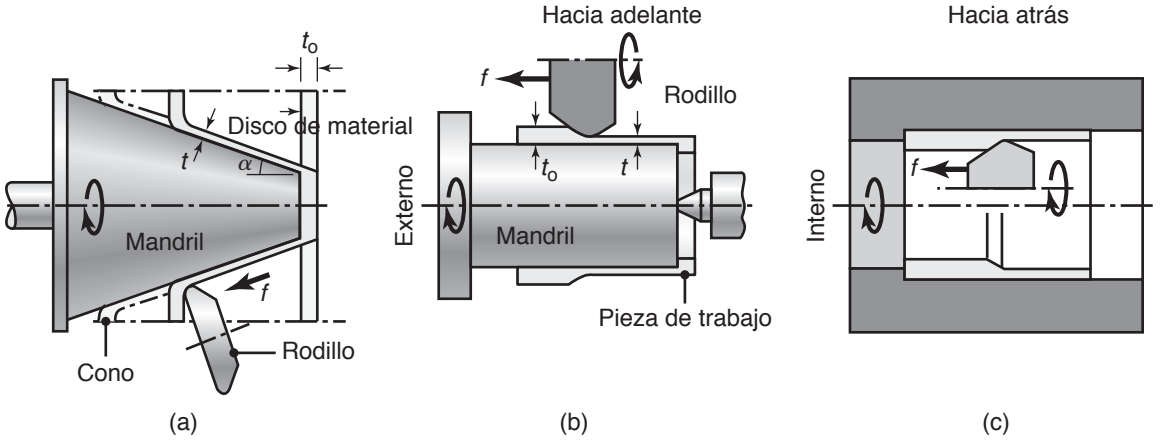


FIGURA 16.49 (a) Ilustración esquemática del proceso de rechazado de corte para la fabricación de piezas cónicas; el mandril puede configurarse de manera que las piezas curvilíneas se puedan formar. (b) y (c) Ilustraciones esquemáticas del proceso de rechazado de tubos.

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 mandril. 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.

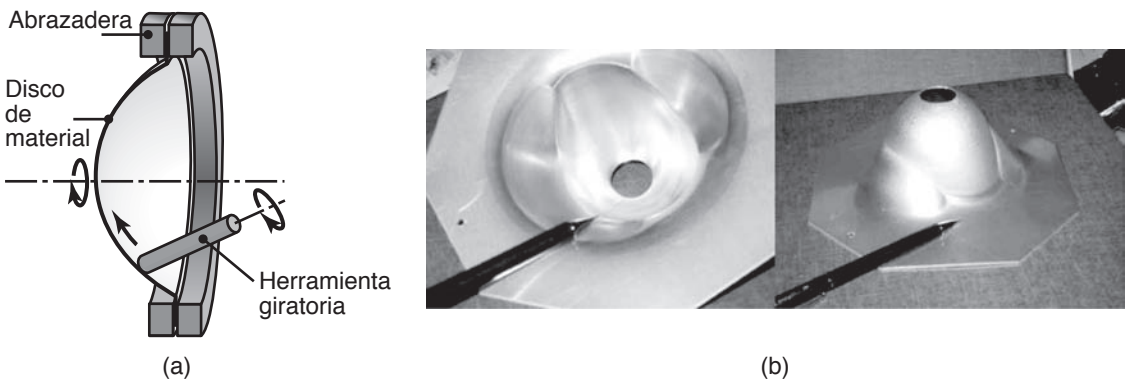


FIGURA 16.50 (a) Ilustración de una operación de formado incremental; observe que no se utiliza ningún mandril y que la forma de la pieza final depende de la trayectoria de la herramienta giratoria. (b) Reflector del faro de un automóvil producido mediante formado incremental CNC. Note que la pieza no 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 interfases 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.

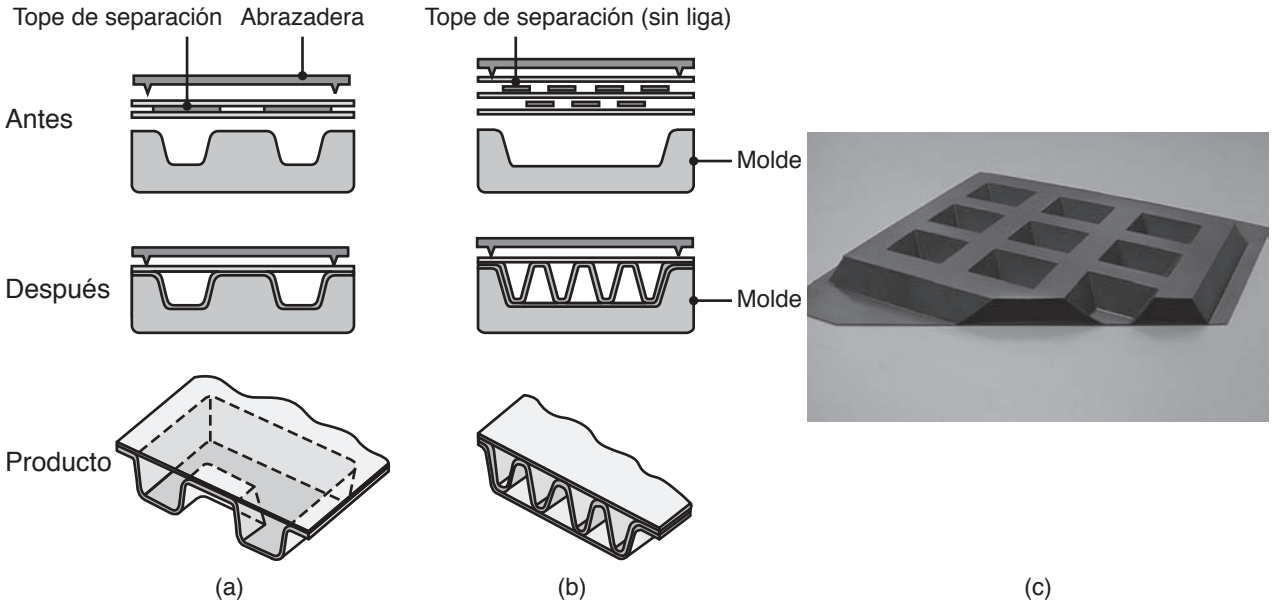


FIGURA 16.51 Tipos de estructuras hechas por formado superplástico y unión por difusión de láminas metálicas; tales estructuras tienen una alta relación de rigidez a peso. *Fuente:* (a) y (b) Cortesía de Boeing Company. Impreso con autorización. (c) Cortesía de Triumph Group, Inc.

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 templa, 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

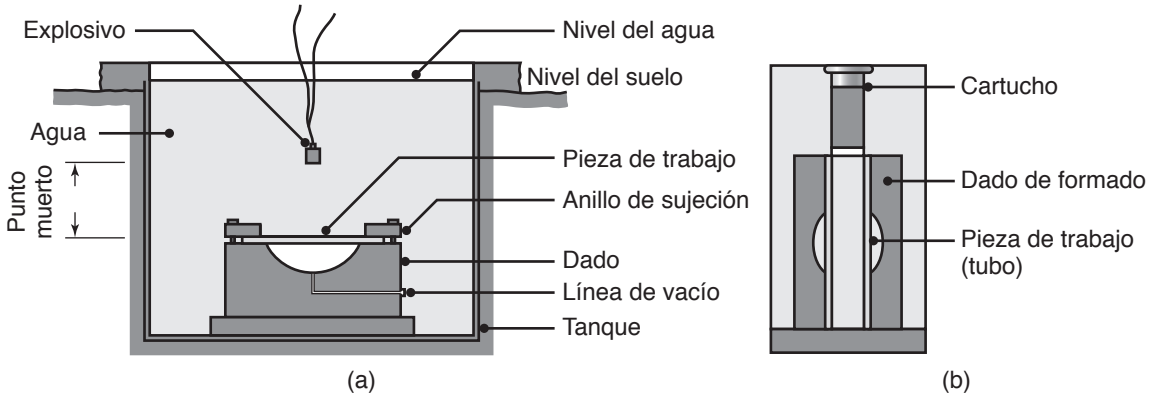


FIGURA 16.52 (a) Ilustración esquemática del proceso de formado explosivo. (b) Ilustración del método confinado para el abombamiento explosivo de tubos.

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

$$p = K\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^a, \tag{16.15}$$

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).

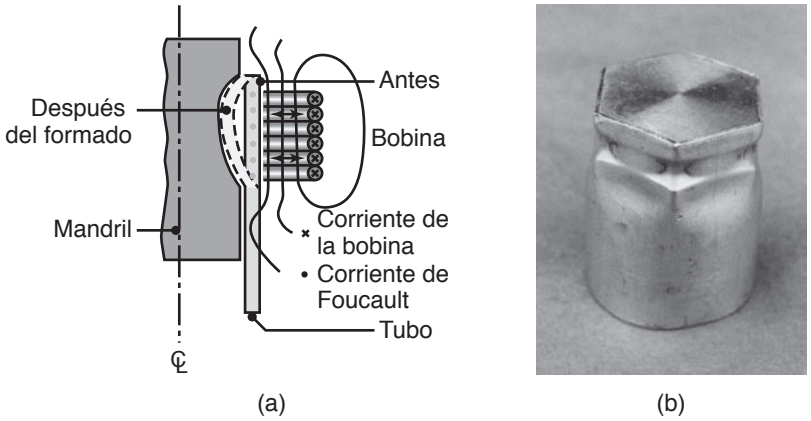


FIGURA 16.53 (a) Ilustración esquemática del proceso de formado por impulso magnético que se utiliza para formar un tubo sobre un tapón. (b) Tubo de aluminio colapsado sobre un tapón hexagonal mediante el proceso de formado por impulso magnético.

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.

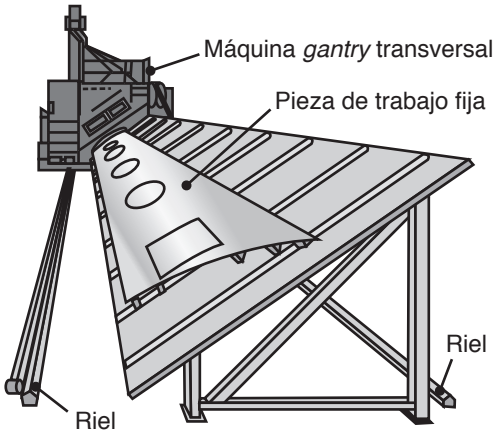


FIGURA 16.54 Ilustración esquemática de una máquina de formado por repujado para dar forma a una pieza grande de lámina metálica, como el revestimiento de un panel para avión; observe que la lámina está fija y que la cabeza de repujado se desplaza por toda su longitud. *Fuente:* Metal Improvement Company.

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, acuñadas, 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.

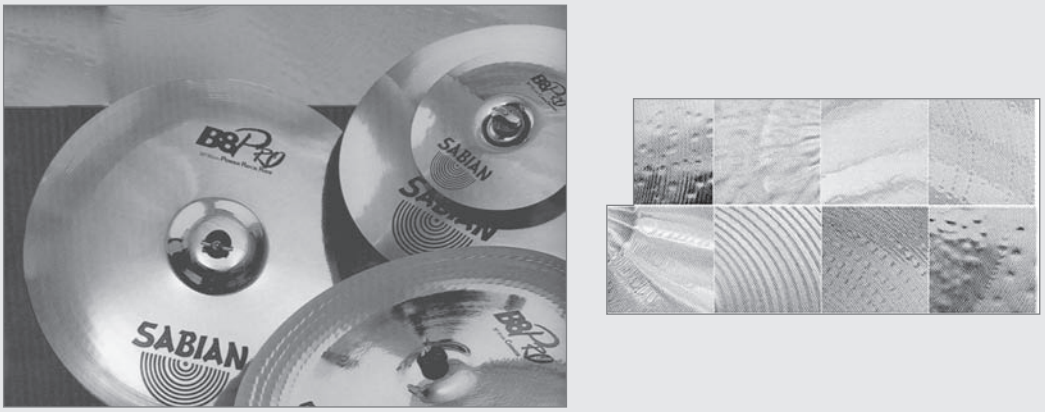
CASO DE ESTUDIO 16.4 Manufactura de címbalos (platillos)

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, martilleos 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 sucesivamente, 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*)



(a) (b)

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.

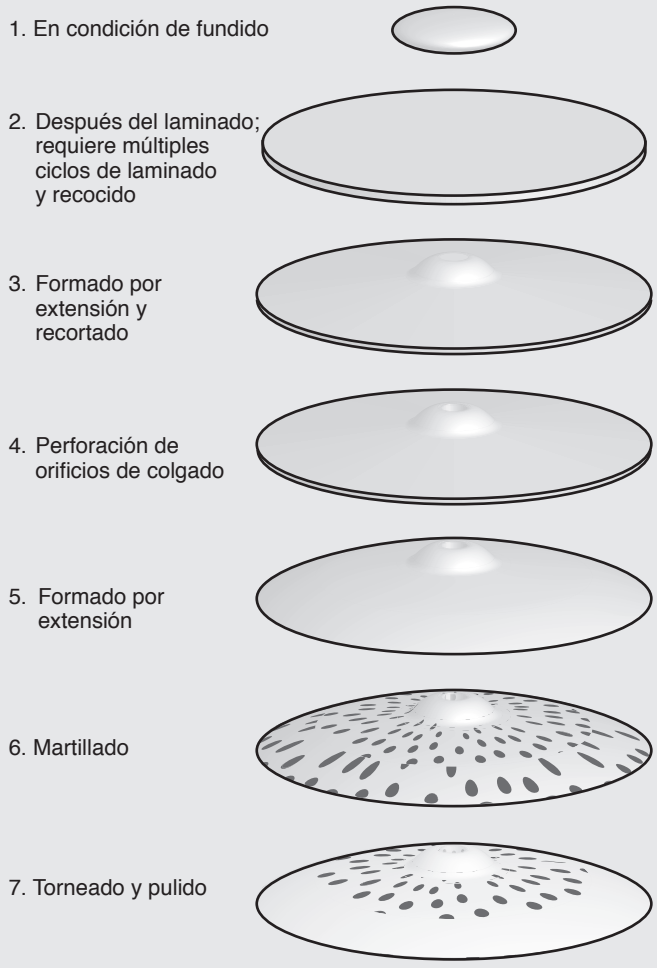


FIGURA 16.56 Secuencia de manufactura para la producción de címbalos. *Fuente:* Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

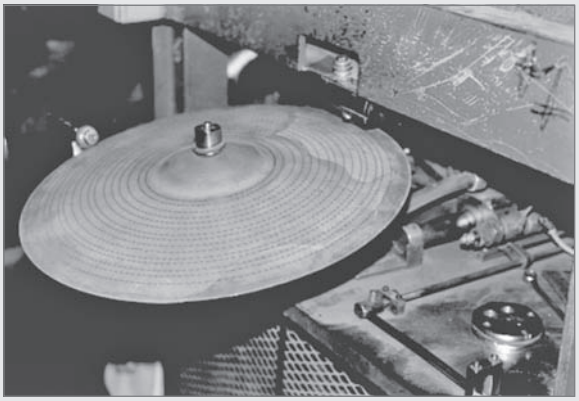


FIGURA 16.57 Martillado automático de un platillo en una máquina de repujado. *Fuente:* Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

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 utilizar 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 panal

Una *estructura en forma de panal* se compone, básicamente, de un núcleo de panal, 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 panal 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 panales de aluminio con un depósito de combustible integrado. Las estructuras de panal también pueden hacerse de materiales no metálicos, como polímeros y diversos materiales compósitos.

Las estructuras de panal se hacen comúnmente de aluminio de la serie 3000, pero también pueden fabricarse en titanio, aceros inoxidables 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.

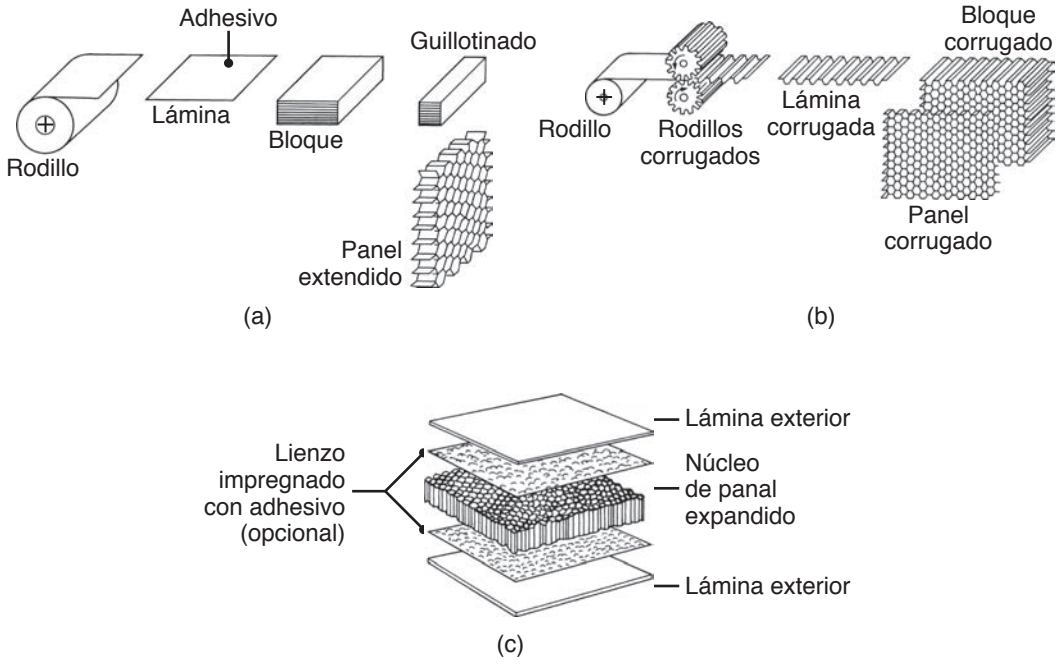


FIGURA 16.58 Métodos de manufactura para estructuras de panal: (a) proceso de expansión, (b) proceso de corrugación y (c) ensamble de una estructura de panal en un laminado.

Existen dos métodos básicos para la manufactura de materiales de panal. 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 panal.

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 panal 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 doblez es un área altamente esforzada, todas las concentraciones de esfuerzo deben retirarse de la ubicación del radio de doblez, por ejemplo los orificios cercanos a las curvas. Resulta ventajoso desplazar el orificio a cierta distancia de la zona de doblez, 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.

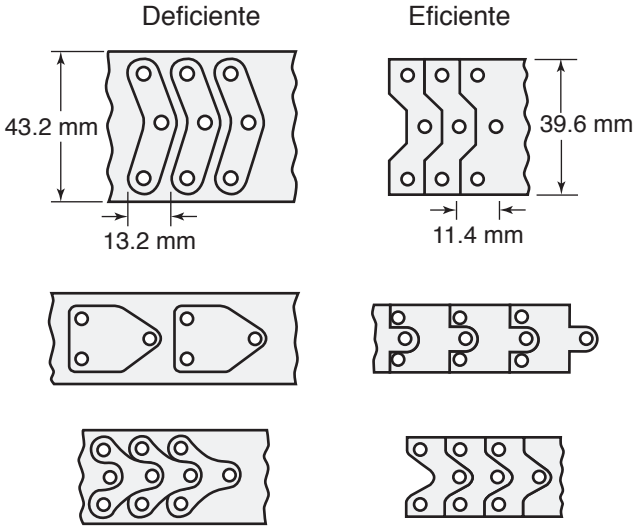


FIGURA 16.59 Anidación eficiente de piezas para la utilización óptima del material en el troquelado. *Fuente:* Reutilizado con autorización de la Society of Manufacturing Engineers en *Die Design Handbook*, 3a. ed., editado por David Smith.

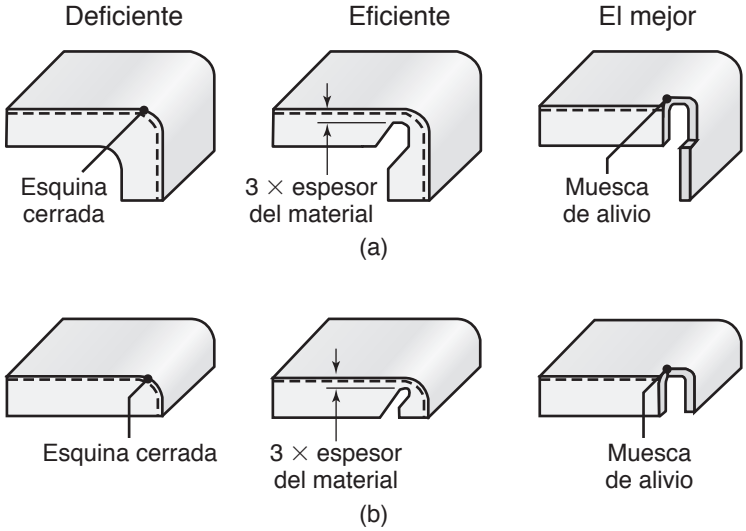


FIGURA 16.60 Control del desgarrado y del pandeo de dos diferentes bridas en un doblez en ángulo recto. *Fuente:* Reutilizado con autorización de la Society of Manufacturing Engineers en *Die Design Handbook*, 3a. ed., editado por David Smith.

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 espaciamiento 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

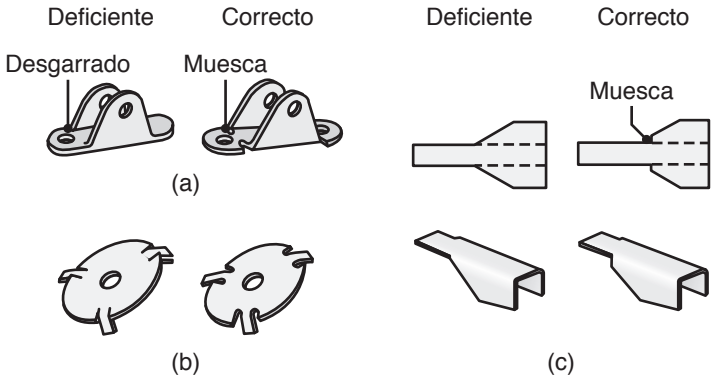


FIGURA 16.61 Aplicación de muescas para evitar el desgarramiento y los pliegues en las operaciones de doblado en ángulo recto. *Fuente:* Reutilizado con autorización de la Society of Manufacturing Engineers en *Die Design Handbook*, 3a. ed., editado por David Smith.

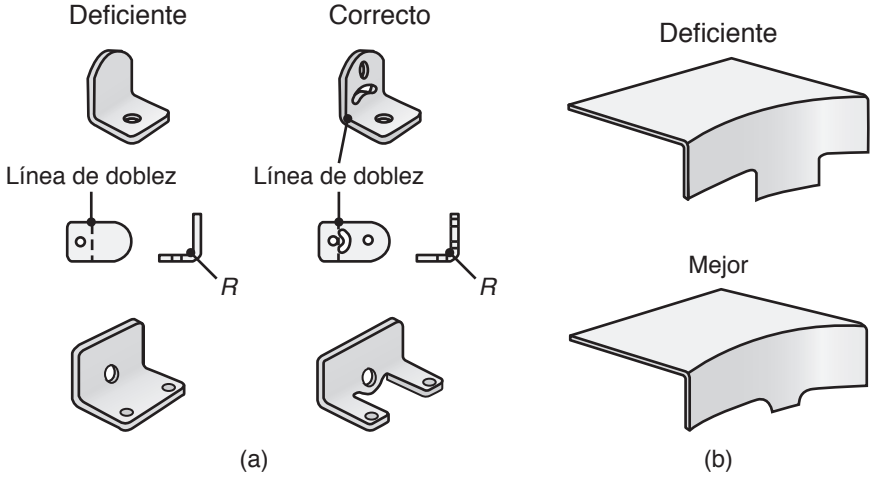


FIGURA 16.62 Concentraciones de esfuerzo cerca de los dobleces. (a) Uso de una media luna u oreja para un orificio cercano a un doblez. (b) Reducción de la severidad de la pestaña en la brida. *Fuente:* Reutilizado con autorización de la Society of Manufacturing Engineers en *Die Design Handbook*, 3a. ed., editado por David Smith.

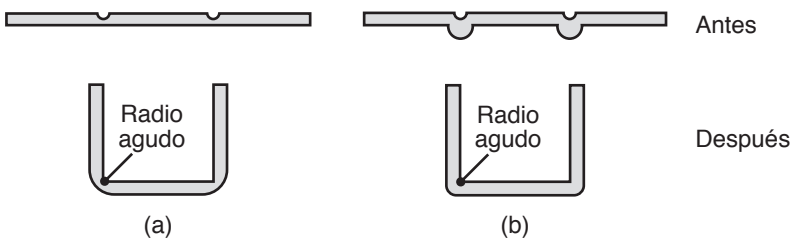
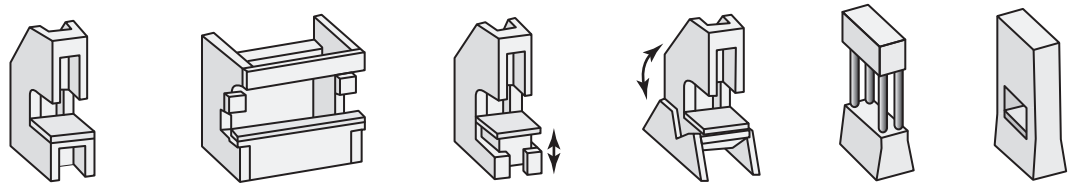


FIGURA 16.63 Aplicación de (a) grabado o (b) realzado para obtener un radio interior agudo en el doblez. A menos que se diseñen adecuadamente, estas características pueden conducir a fracturas. *Fuente:* Reutilizado con autorización de la Society of Manufacturing Engineers en *Die Design Handbook*, 3a. ed., editado por David Smith.

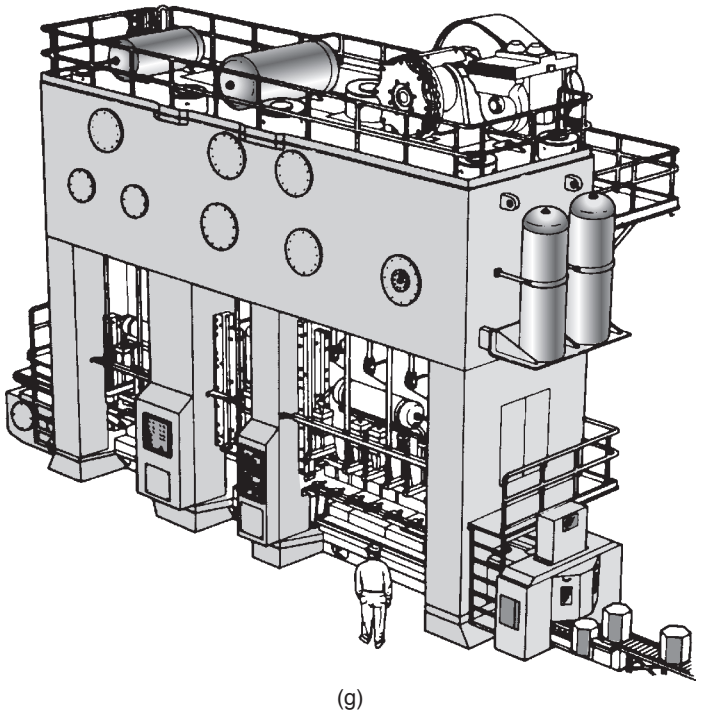
requieren una pared vertical pueden ser difíciles de elaborar. Los ángulos de alivio de al menos 3° en cada pared son más fáciles de producir. Copas con radios internos agudos son difíciles de producir y las copas profundas suelen requerir una o más operaciones de planchado.

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



(a) Diseño básico de marco en C. (b) Diseño amplio. (c) Bancada ajustable. (d) Espalda abierta inclinable. (e) Pilar. (f) Doble columna.



(g)

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.

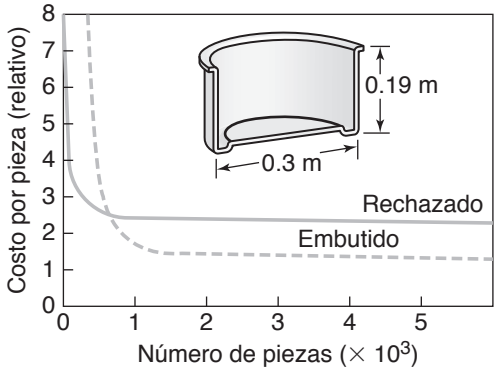


FIGURA 16.65 Comparativo de costos para la manufactura de un contenedor redondo de lámina metálica, ya sea por rechazado convencional o por embutido profundo; observe que para cantidades pequeñas, el rechazado es más económico.

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 dados 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.

- 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
Anidación
Anisotropía normal
Anisotropía planar
Anisotropía plástica
Arrugamiento (pliegues)
Bandas de Lüder
Bordes ondulados
Bridado
Capacidad al doblez ("doblabilidad")
Cizallamiento
Cortado longitudinal
Desbarbado
Diagrama de límite de formado
Doblado
Embutido
Embutido profundo
Estampado en caliente
Estructuras de panal
Formabilidad
Formado asistido por láser
Formado con rodillos
Formado de hule
Formado electrohidráulico
Formado explosivo
Formado incremental
Formado por extensión
Formado por impulso magnético
Formado superplástico
Formatos soldados a la medida
Frenos de embutido (rebordes)
Hilvanado
Holgura
Holgura de doblado
Horadado
Microformado
Niblado
Pisador de pieza
Planchado
Prensa excéntrica
Proceso de hidroformado
Punzonado
Radio mínimo de doblez
Rasurado
Realzado
Rebaba
Rebordeado
Rechazado
Reembutido
Reglas de acero
Relación de embutido límite
Repujado
Resistencia a la abolladura
Restitución
Superficie pulida
Troquelado
Troquelado fino
Troqueles compuestos
Troqueles de transferencia
Troqueles progresivos

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?
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?

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?
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?

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.
16.43 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 doblez 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 doblez mínimo para una lámina metálica de 1.0 mm de espesor con una reducción del área a la tensión de 30%? ¿El ángulo de doblez 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.

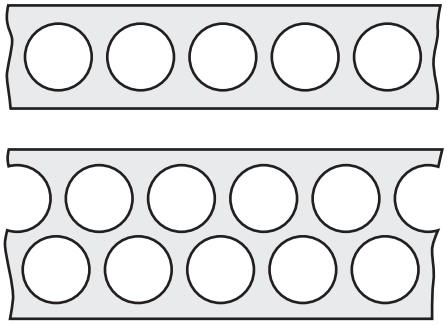


FIGURA P16.55

16.56 Grafique el radio de doblez final como una función del radio de doblez 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.

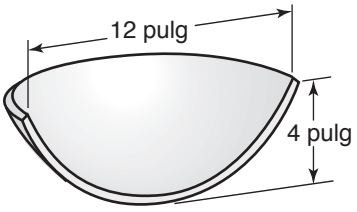


FIGURA P16.57

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.

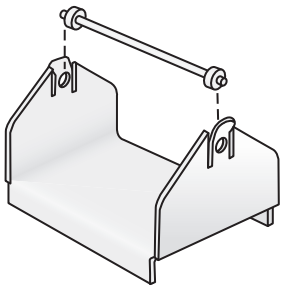


FIGURA P16.65

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 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. Bosqueje 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.

CAPÍTULO

17 Procesos y equipos para los metales en polvo

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

Código QR 17.1 Introducción a la metalurgia de polvos. (*Fuente:* Cortesía de la Metal Powder Industries Federation).

- 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,

(a) (b) (c)

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 inoxidables 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

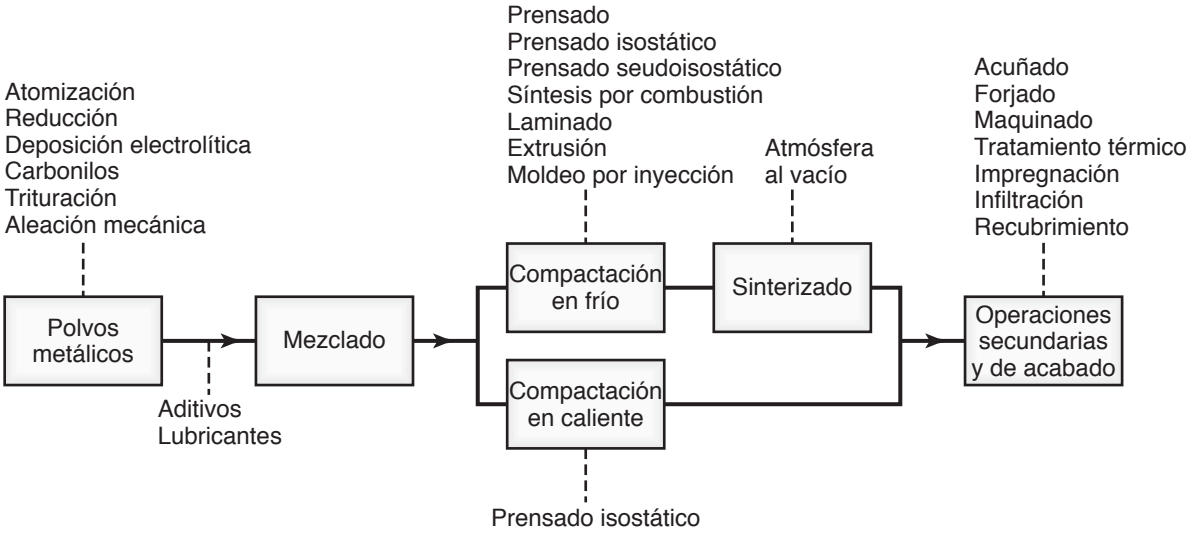


FIGURA 17.2 Esquema de los procesos y operaciones que intervienen en la producción de piezas por metalurgia de polvos.

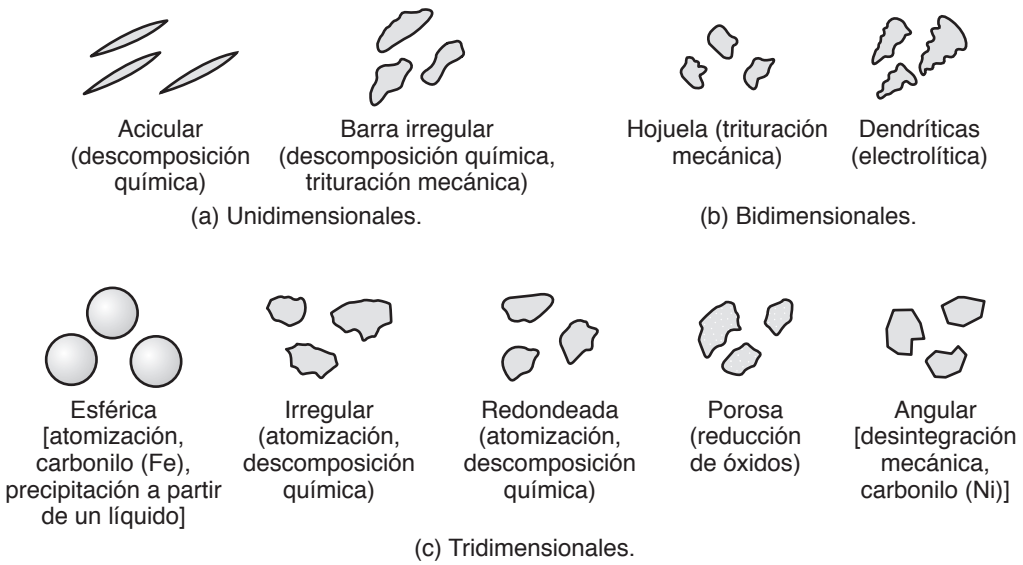


FIGURA 17.3 Formas de partícula en los polvos metálicos y procesos mediante los cuales se producen; los polvos de hierro se producen mediante muchos de estos procesos (vea también la figura 17.4).

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.

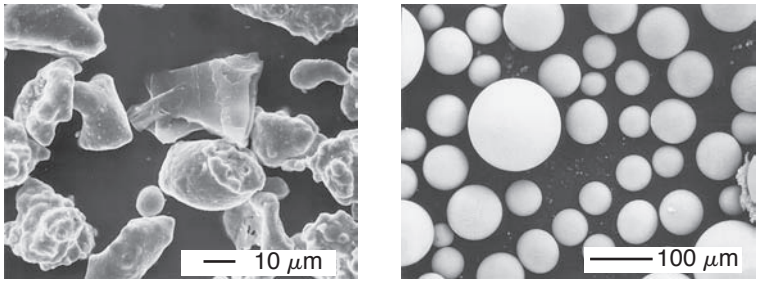


FIGURA 17.4 (a) Imagen por microscópica electrónica de barrido de partículas de hierro en polvo generadas por atomización. (b) Partículas de polvo de una superaleación base níquel (Udimet 700) hechas por el proceso de electrodo giratorio, vea la figura 17.5d. *Fuente:* Cortesía de P. G. Nash, Illinois 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.

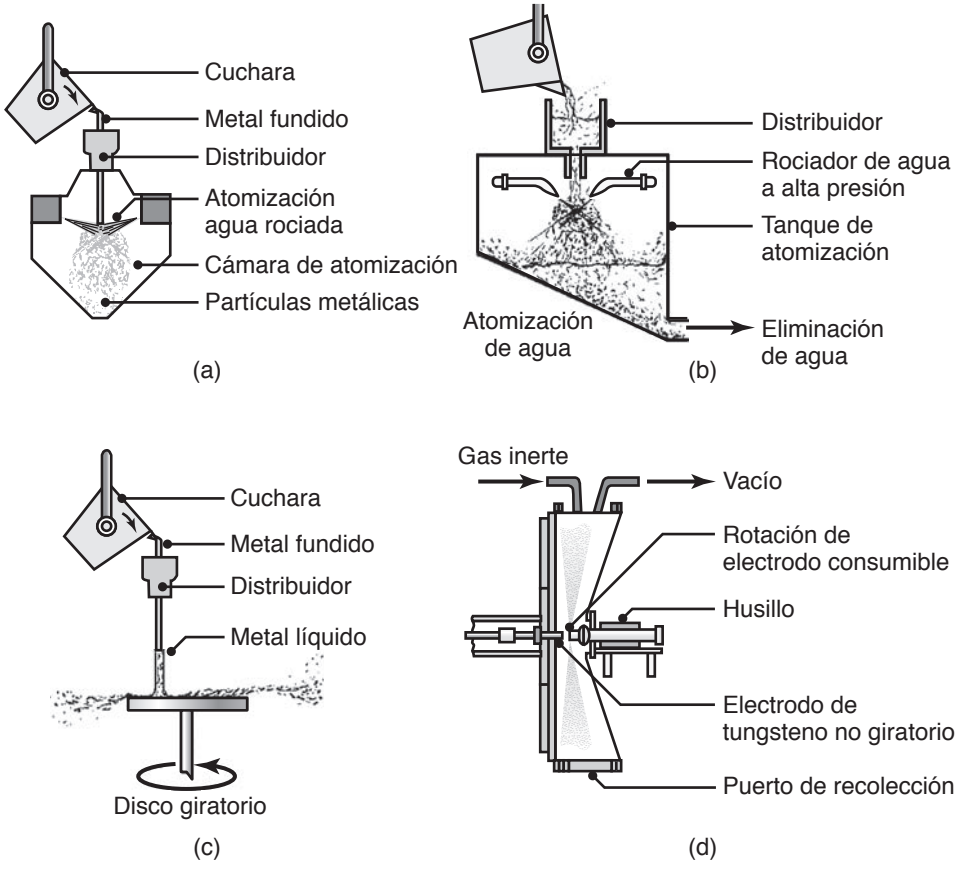


FIGURA 17.5 Métodos de producción de polvo metálico por atomización: (a) atomización por gas; (b) atomización por agua; (c) atomización centrífuga con un disco o una copa que giran, y (d) atomización con un electrodo consumible giratorio.

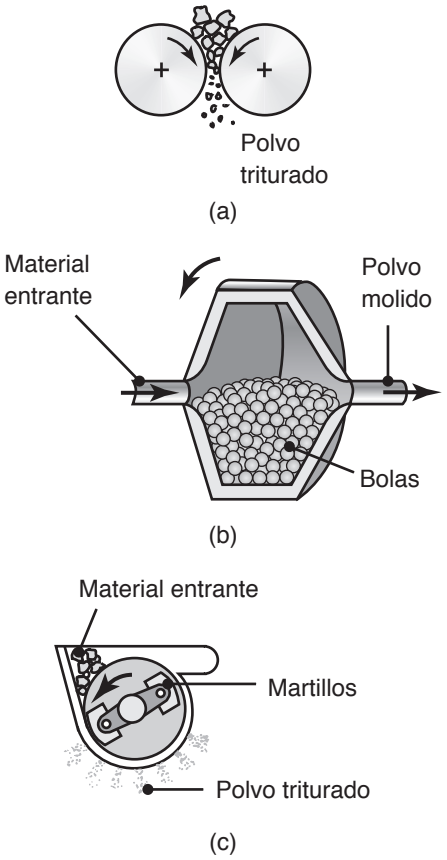


FIGURA 17.6 Métodos de trituración mecánica para obtener partículas finas: (a) trituración con rodillos; (b) molino de bolas y (c) molino de martillos.

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 *trituración 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.

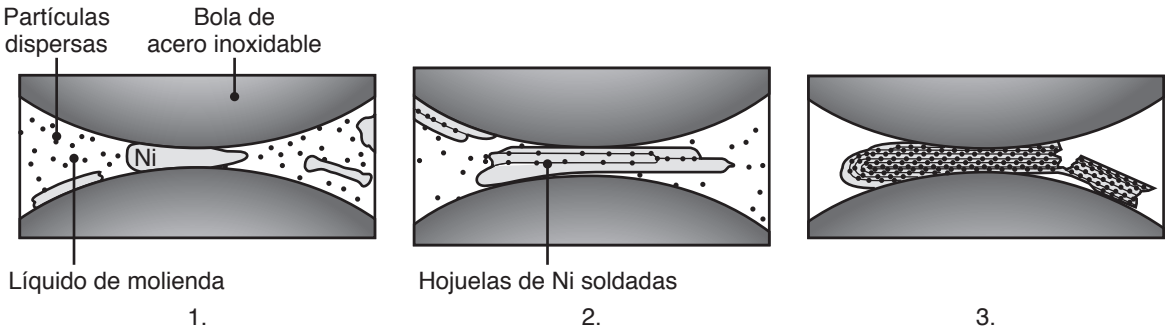


FIGURA 17.7 Secuencia de aleación mecánica de partículas de níquel con pequeñas partículas dispersas. Cuando las partículas de níquel se aplanan entre dos bolas, la segunda fase, más pequeña, se imprime en la superficie del níquel y, finalmente, se dispersa por toda la partícula debido al aplanamiento, 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

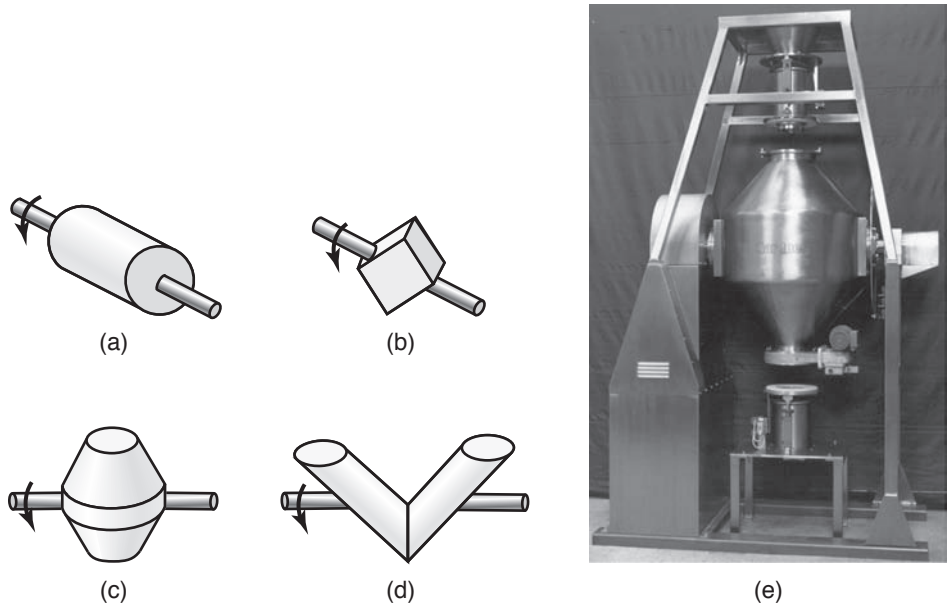


FIGURA 17.8 (a) a (d) Algunas geometrías comunes de los tambores utilizados para el mezclado o combinando de polvos. (e) Mezclador adecuado para la combinación de polvos metálicos. Puesto que los polvos metálicos son abrasivos, los mezcladores se basan en la rotación o el volteo de geometrías cerradas, 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 mecánica 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).

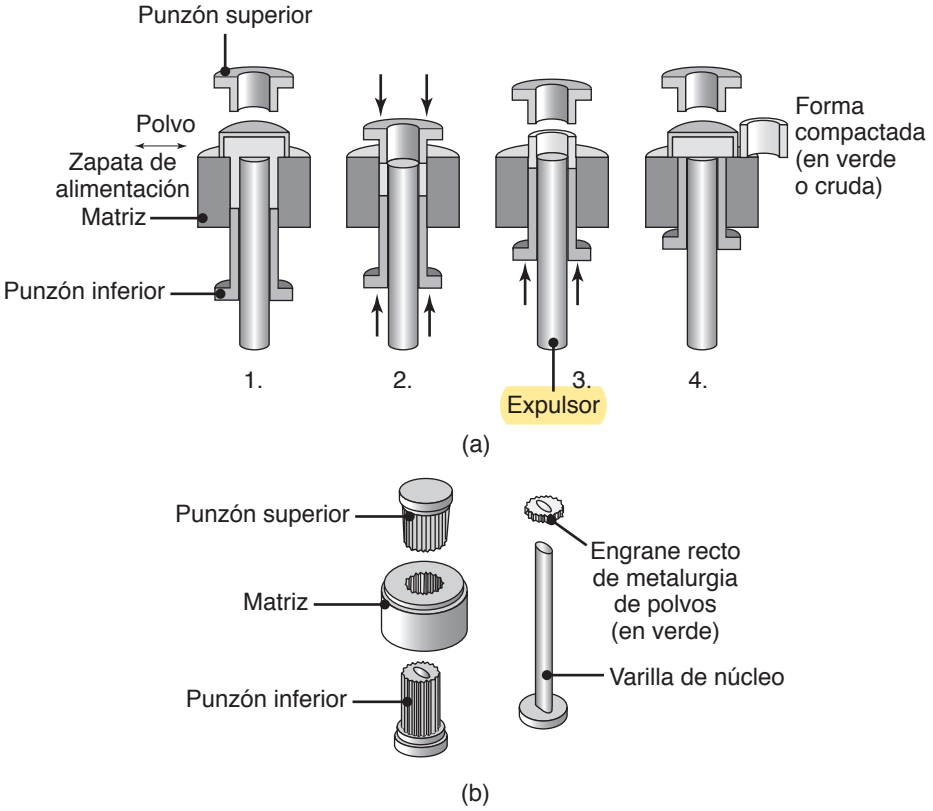


FIGURA 17.9 (a) Compactación de polvo metálico para formar un buje; la pieza de polvo presionado se denomina comprimido en verde o crudo. (b) Herramienta típica y juego de matrices para compactar un engrane recto. *Fuente:* Reproducido con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.

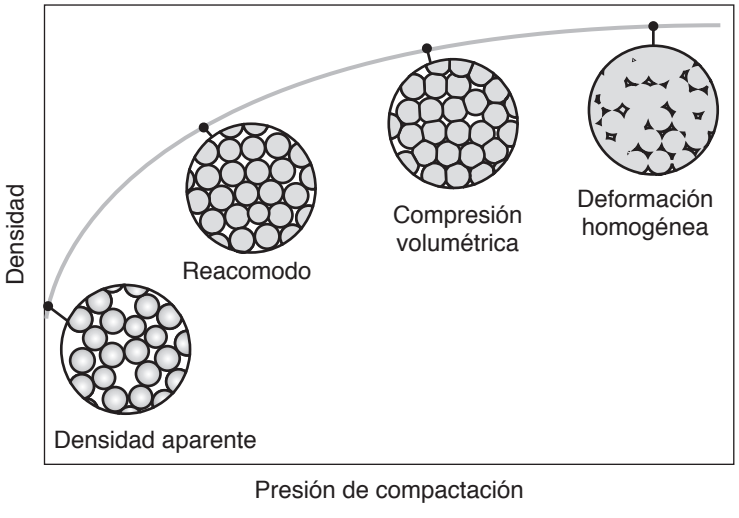


FIGURA 17.10 Compactación de polvos metálicos; a bajas presiones de compactación, el polvo se reacomoda sin deformarse, lo cual conduce a una alta rapidez de aumento de la densidad. Una vez que los polvos se compactan en forma más estrecha, se produce deformación plástica en sus interfases, esto conduce a aumentos adicionales de la densidad pero a rapideces menores. A densidades muy altas, el polvo se comporta como un sólido a granel.

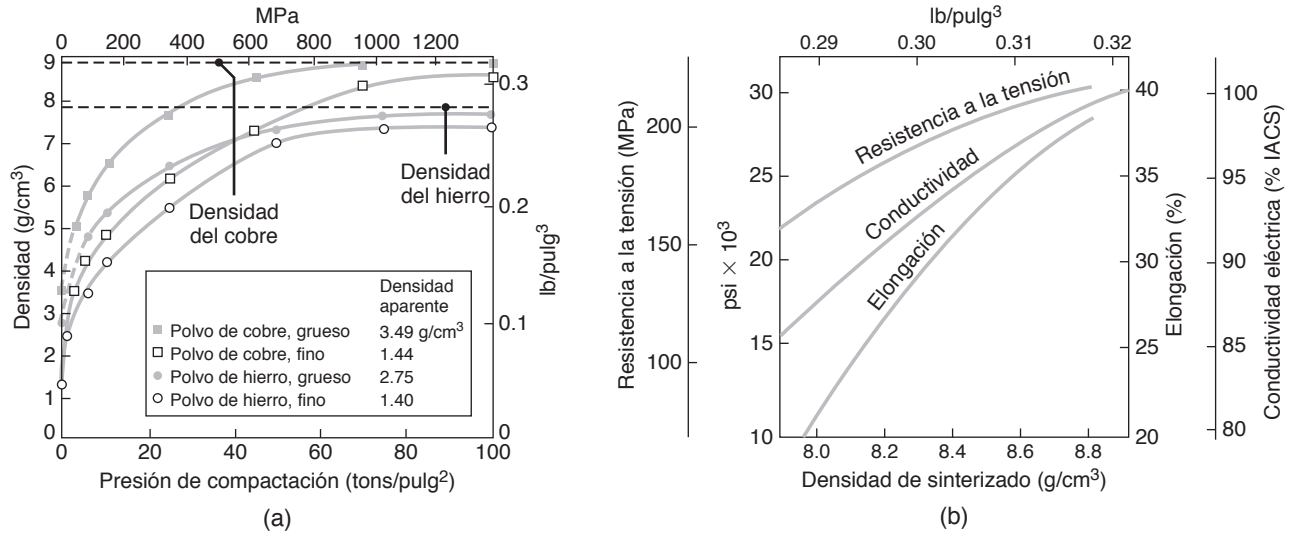


FIGURA 17.11 (a) Densidad de los comprimidos de polvo de cobre y hierro como una función de la presión de compactación; la densidad influye en gran medida sobre las propiedades mecánicas y físicas de las piezas de metalurgia de polvos. (b) Efecto de la densidad sobre la resistencia a la tensión, elongación 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.

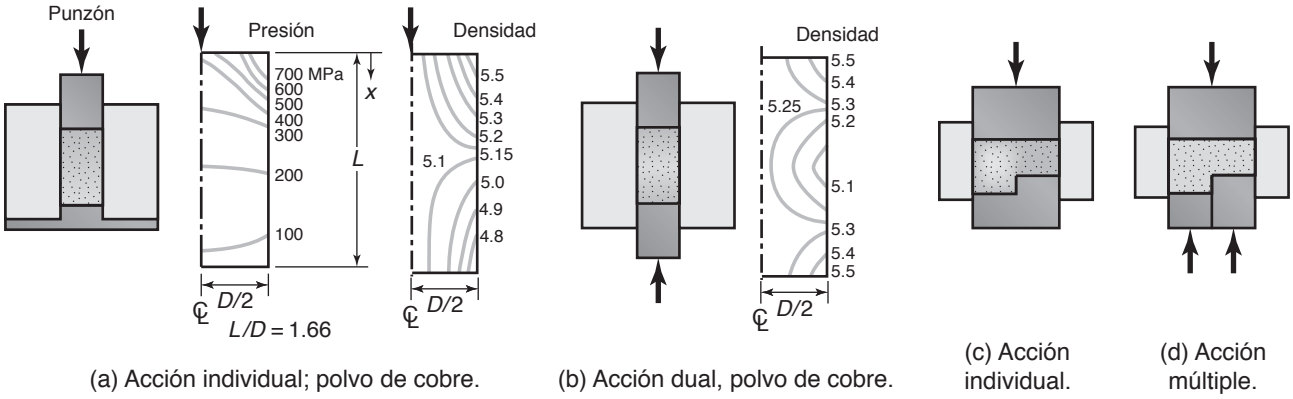


FIGURA 17.12 Variación de la densidad al compactar polvos metálicos en diversas matrices.

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).

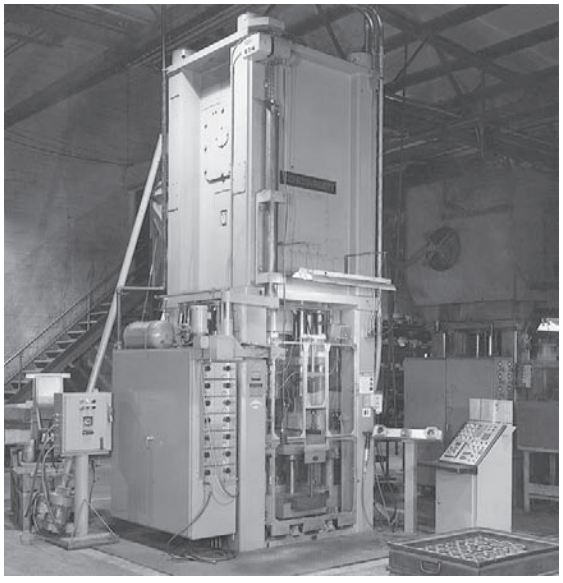


FIGURA 17.13 Prensa mecánica de 7.3 MN (825 ton) para la compactación de polvo metálico. *Fuente:* Cortesía de Cincinnati Incorporated.

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.

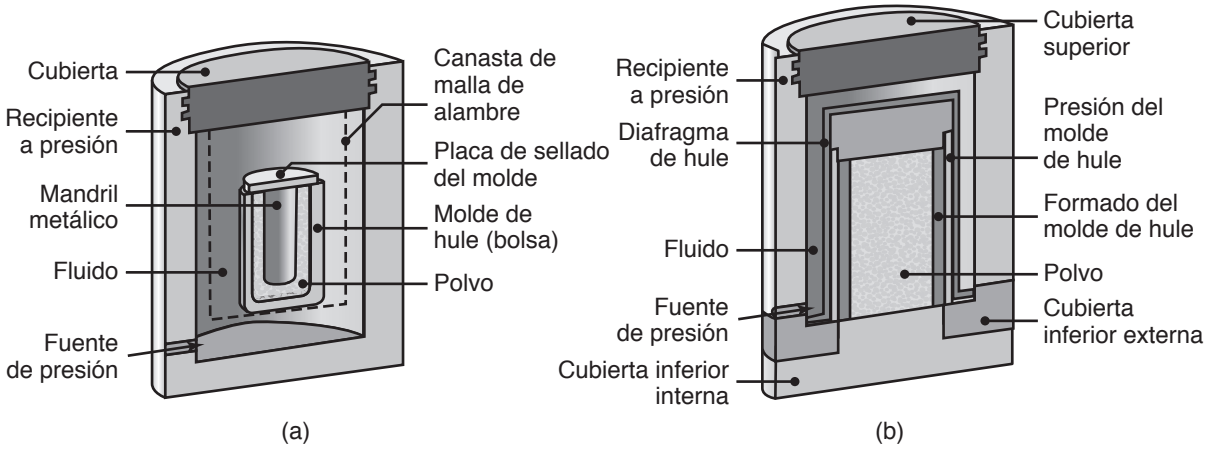


FIGURA 17.14 Diagramas esquemáticos de prensado isostático en frío; la presión se aplica isostáticamente dentro de una cámara a alta presión. (a) Proceso de bolsa húmeda para formar una pieza en forma de copa; el polvo está contenido en un recipiente flexible alrededor de una varilla de núcleo sólido. (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.

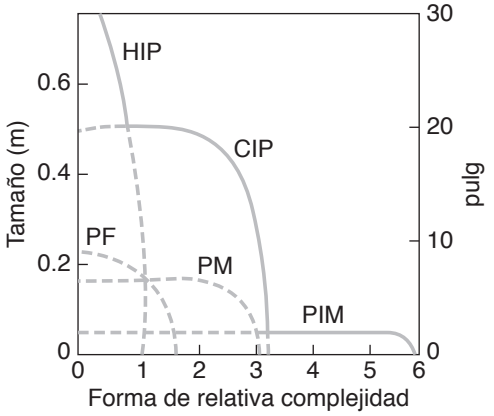


FIGURA 17.15 Capacidades disponibles, con respecto al tamaño de la pieza y la complejidad de la forma, de diversas operaciones de metalurgia de polvos. PF significa forjado de polvos. *Fuente:* Reproducida con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.

Código QR 17.2 Prensado isostático en caliente. (*Fuente:* Cortesía de la Metal Powder Industries Federation).

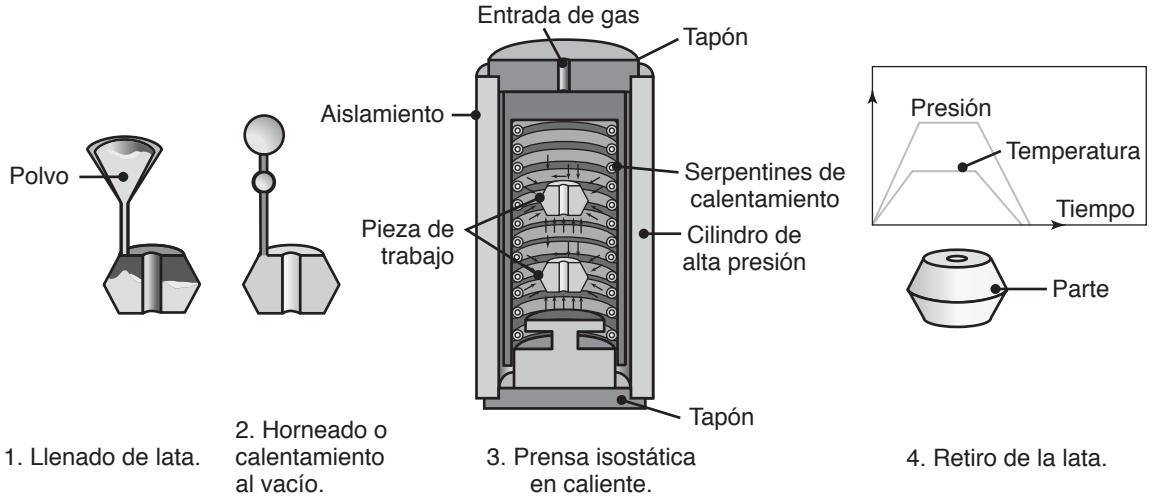


FIGURA 17.16 Ilustración esquemática del prensado isostático en caliente; en el diagrama se muestran las variaciones de la presión y la temperatura en función del tiempo (sin escala).

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

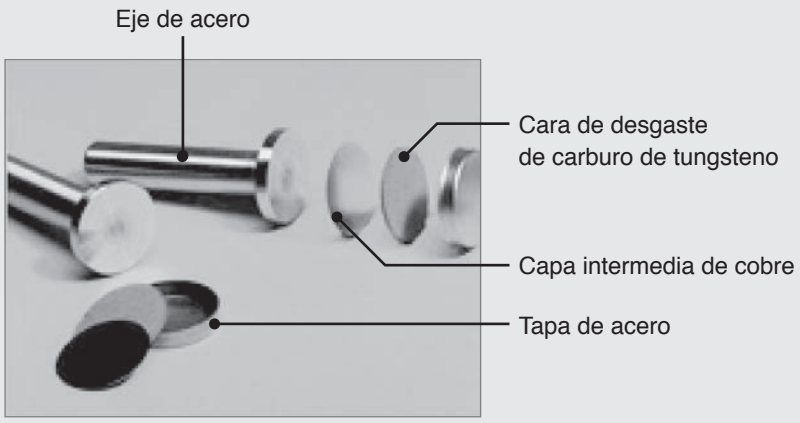


FIGURA 17.17 Elevador de válvula para motores diesel de uso pesado producido a partir de una tapa de carburo prensado de manera isostática en caliente sobre un eje de acero. *Fuente:* Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

una densidad de entre 14.52 y 14.72 g/cm^3, 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 experimentado 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.

Código QR 17.3 Descripción general del moldeo por inyección de metal. (*Fuente:* Cortesía de la Metal Powder Industries Federation).

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 compite bien con las fundiciones en dado de zinc y aluminio (sección 11.4.5) ni con el maquinado de tornillo (sección 23.3.4).

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.

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).

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.

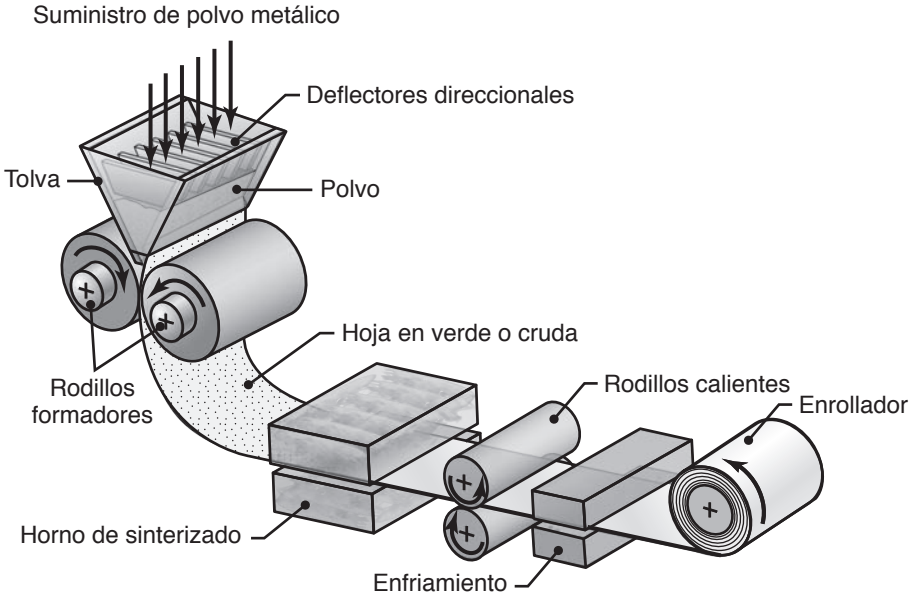


FIGURA 17.20 Ilustración del laminado de polvo metálico.

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

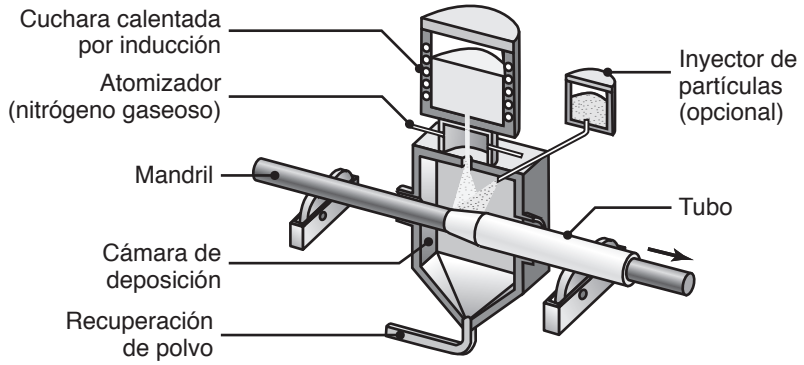


FIGURA 17.21 Deposición por rocío (*proceso Osprey*) donde el metal fundido se rocía sobre un mandril giratorio para producir tubos sin costura.

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

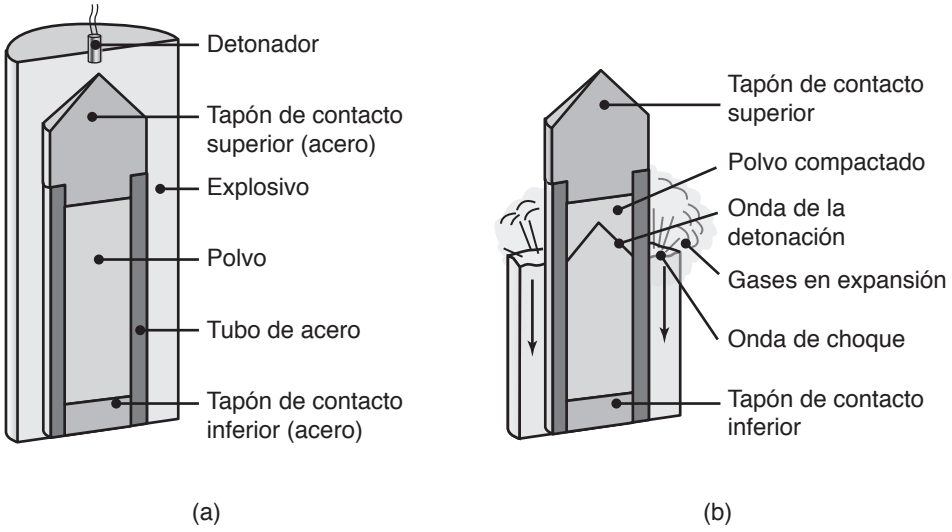


FIGURA 17.22 Ilustración esquemática de la compactación explosiva. (a) Un tubo llenado con polvo se rodea con medios explosivos dentro de un contenedor, normalmente de cartón o madera. (b) Después de la detonación, una onda de compresión sigue a la onda de la detonación, lo que resulta en una pieza de polvo metálico compactado.

choque que viaja a través del comprimido desarrollando calor y presión suficientes como para compactar el polvo metálico.

Prensado seudoisostático. En el *prensado seudoisostático*, 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 μm (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 inoxidables	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 descarburación 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 inoxidables. Los gases que se usan con más frecuencia en el sinterizado son el hidrógeno, amoniaco 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.

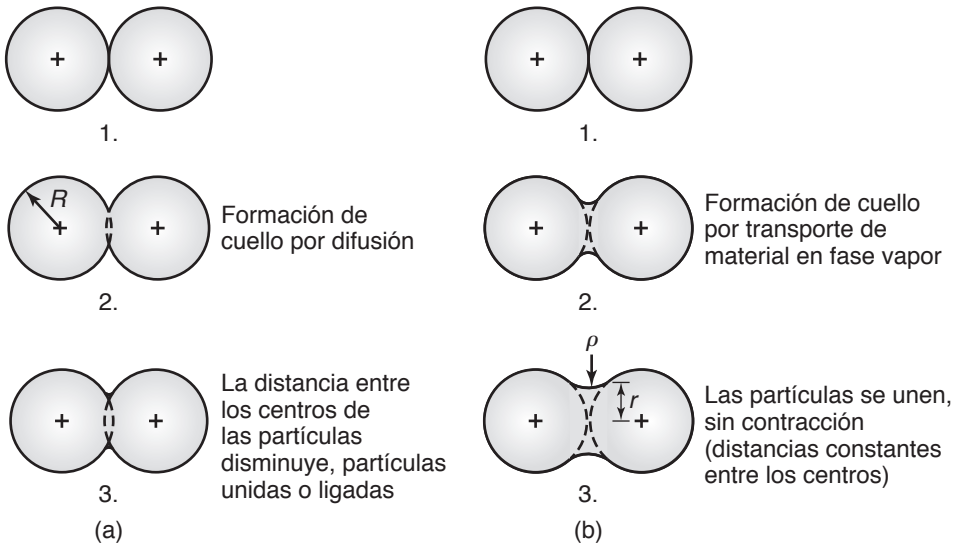


FIGURA 17.23 Ilustración esquemática de dos mecanismos para el sinterizado de polvos metálicos: (a) transporte de material en estado sólido y (b) transporte de material en fase vapor. R = radio de la partícula, r = radio del cuello y ρ = radio del perfil del cuello.

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.

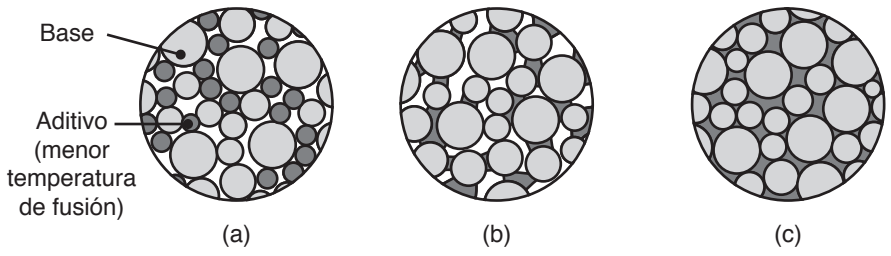


FIGURA 17.24 Ilustración esquemática del sinterizado en fase líquida utilizando una mezcla de dos polvos. (a) Comprimido crudo de un metal base con un punto de fusión más alto y un aditivo a temperatura más baja; (b) fusión líquida, humectación y precipitación repetida en las superficies; (c) material 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.
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	Cobre añadido para resistencia
FC-0008-60	450	520	155	84 HRB	<1	7.2	mecánica, dureza y resistencia al
FC-0008-95		720	150	43 HRC	<1	7.1	desgaste.
FN-0205-20	170	280	115	44 HRB	1	6.6	Buena resistencia con tratamiento
FN-0205-35	280	480	170	78 HRB	5	7.4	térmico, energía de impacto.
FN-0205-180HT		1280	170	78 HRB	<1	7.4	
FX-1005-40	340	530	160	82 HRB	4	7.3	Acero infiltrado con cobre.
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
SS-316N2-38	310	480	140	65 HRB	131	6.9	general.
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
Ax 123-T6	390	400	—	72 HRB	<1	2.7	general.
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
Ax 431-T6	440	470	—	80 HRB	2	2.8	resistencia.
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: [a] La 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. [b] OFHC 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 Stratasys, 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

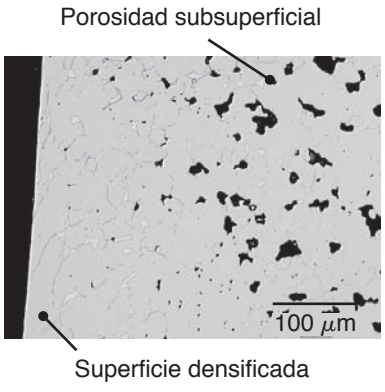


FIGURA 17.25 Micrografía de la superficie de un material de PM después de su densificación con rodillo; observe la baja porosidad cerca de la superficie, lo que incrementa la capacidad de los materiales para soportar los esfuerzos de contacto y resistir la fatiga. *Fuente:* Cortesía de Capstan Atlantic 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):

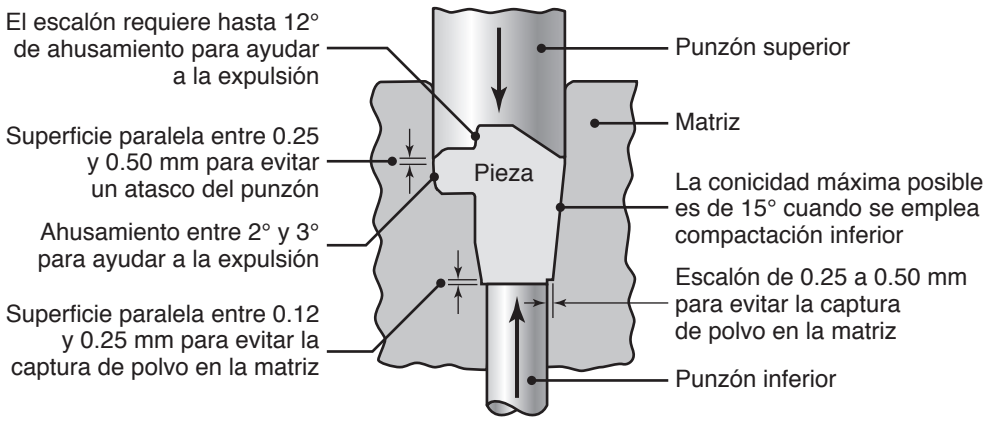


FIGURA 17.26 Geometría de la matriz y características de diseño para la compactación de polvo metálico. *Fuente:* Reproducido con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.

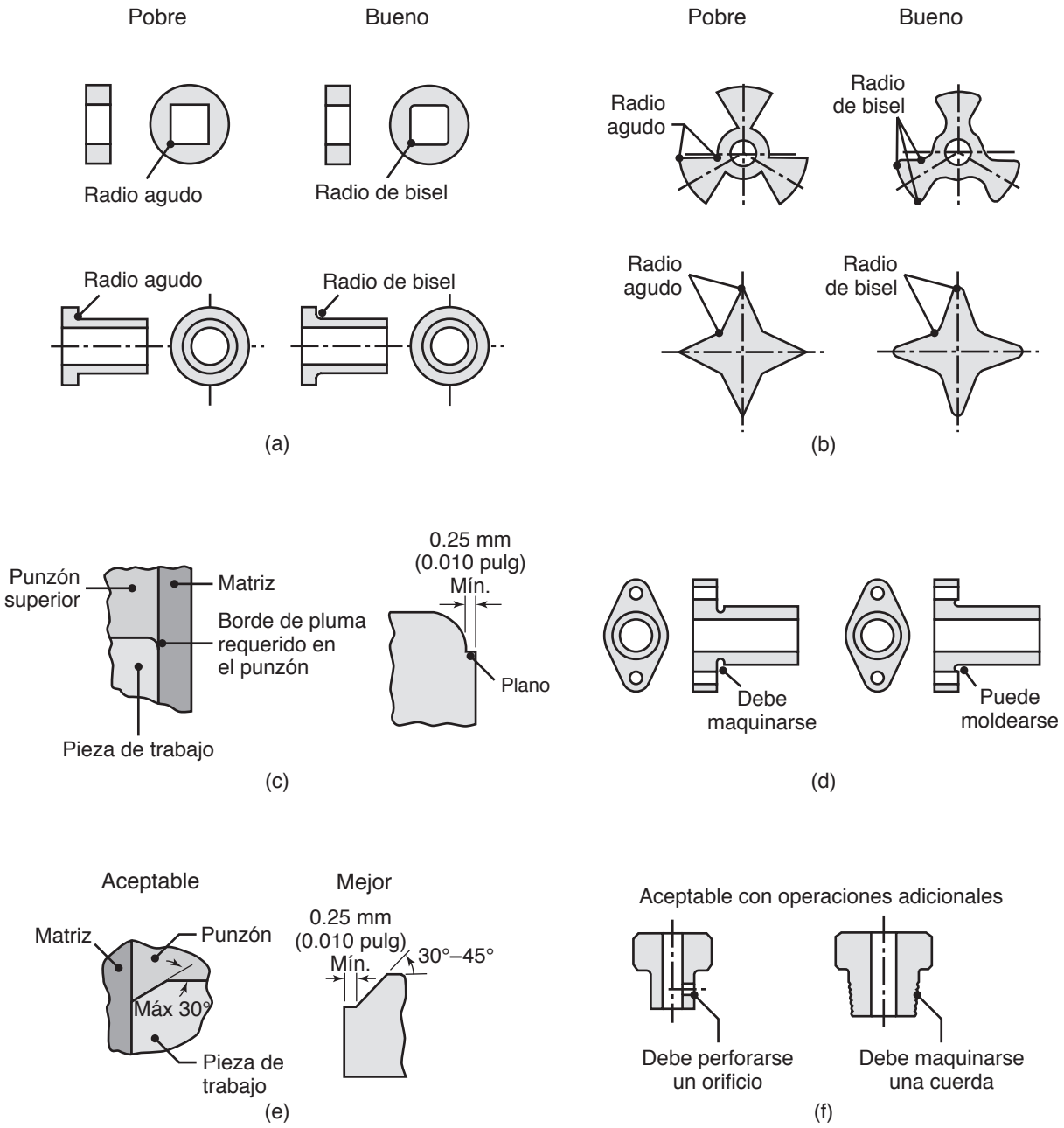


FIGURA 17.27 Ejemplos de piezas fabricadas por metalurgia de polvos que muestran diseños pobres y buenos; observe que deben evitarse los radios agudos y las esquinas de reentrada, también que las cuerdas y los orificios transversales deben producirse por separado mediante operaciones de maquinado adicionales. *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.

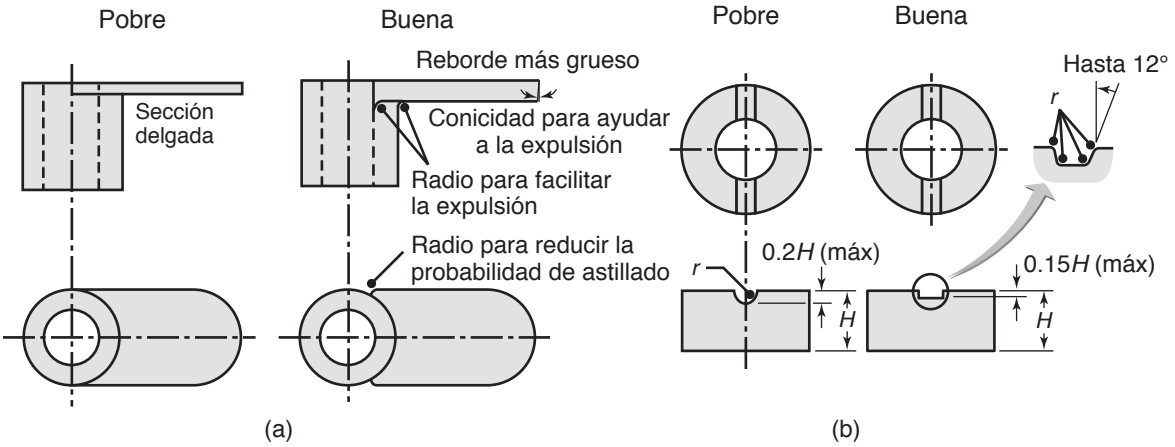


FIGURA 17.28 (a) Características de diseño para su uso con bridas sin soporte. (b) Características de diseño para el uso de ranuras. *Fuente:* Reimpreso con autorización de la Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos.

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 prensarse 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

Piezas de titanio elaboradas por forjado y por metalurgia de polvos y el ahorro en sus costos

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.

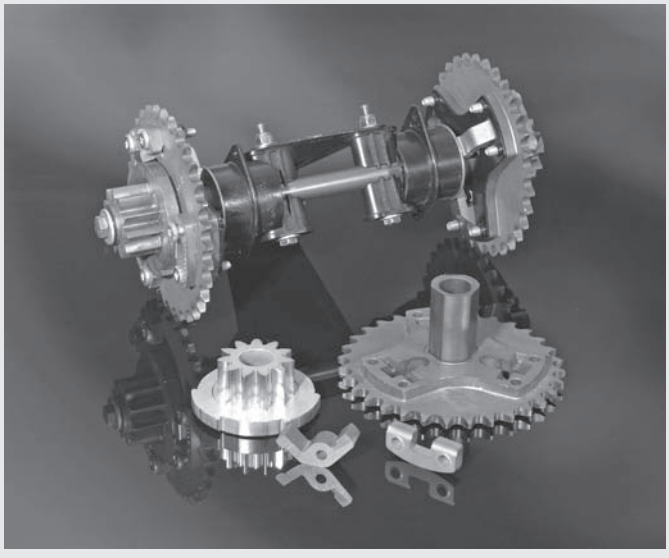


FIGURA 17.29 Piezas fabricadas por metalurgia de polvos y utilizadas en un quitanieves comercial.

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
Atomización
Carbonilos
Compactación
Compactación sin presión
Comprimido o compactado en verde (crudo)
Cribado
Deposición electrolítica
Difusión
Factor de forma
Impregnación
Infiltración
Metalurgia de polvos
Mezclado
Moldeo por inyección
Moldeo por inyección de metal
Moldeo por inyección de polvos
Prensado
Prensado isostático en caliente
Prensado isostático en frío
Reducción
Resistencia en verde
Sinterizado
Sinterizado por chispa
Trituración

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 seudoisostático?
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/pulg^2. 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.

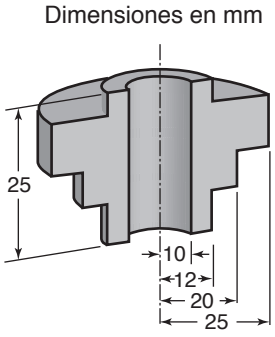


FIGURA P17.41

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?

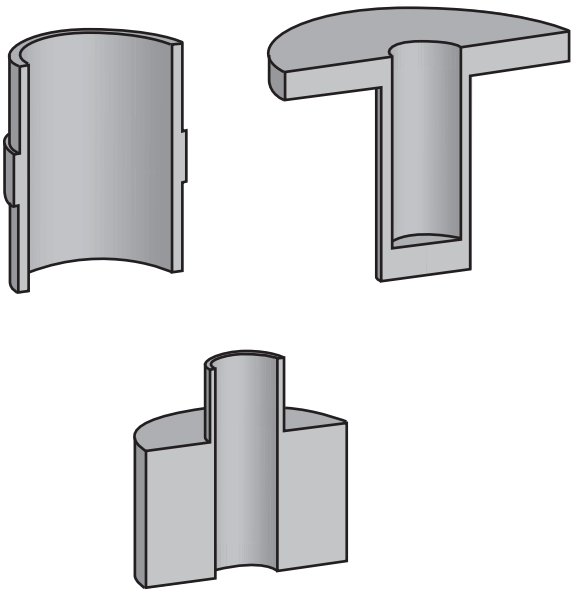


FIGURA P17.54

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 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

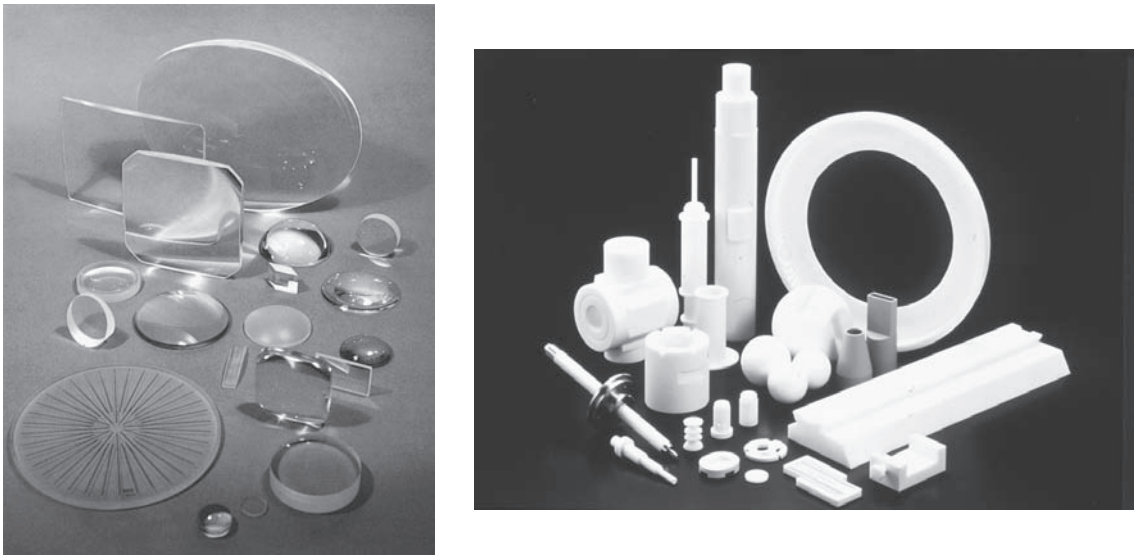
EJEMPLO:
18.1 Cambios dimensionales durante el moldeado de componentes cerámicos 482

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) trituración 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.

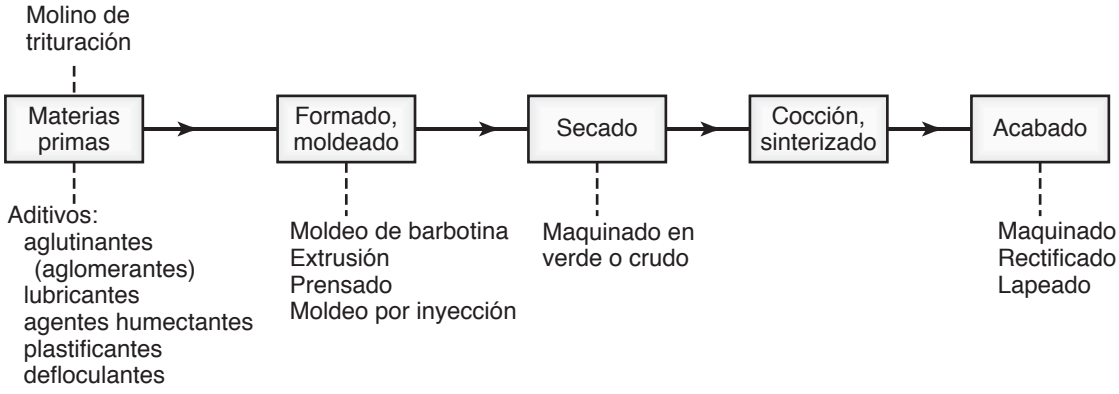


FIGURA 18.2 Etapas de procesamiento involucradas en la fabricación de piezas con materiales cerámicos.

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 moldeado 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

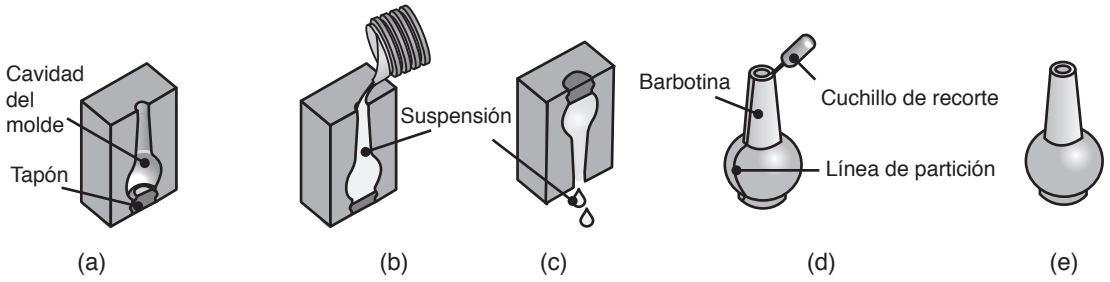


FIGURA 18.3 Secuencia de operaciones en el vaciado de barbotina para una pieza cerámica. (a) El molde se ensambla y se agrega el tapón; algunos tapones incorporan componentes de drenado; (b) la suspensión, una mezcla de partículas de material cerámico, aglutinantes y agua, se vierte en el molde; (c) 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 moldeo 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.

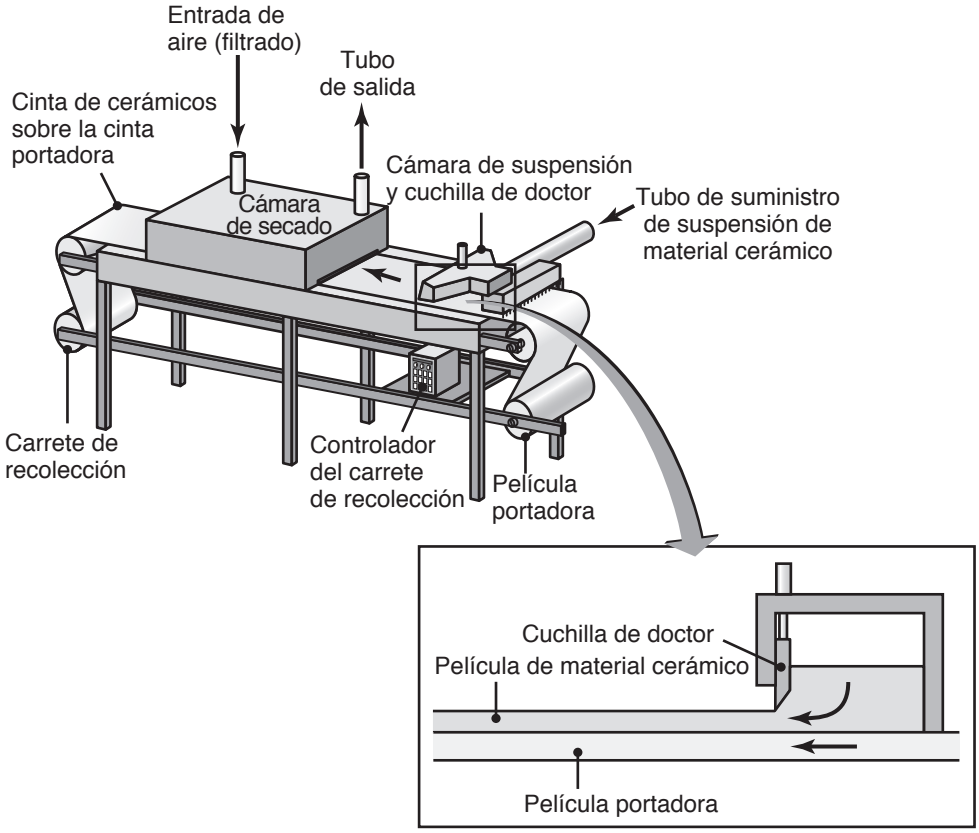


FIGURA 18.4 Producción de hojas cerámicas mediante el proceso cuchilla de doctor.

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,

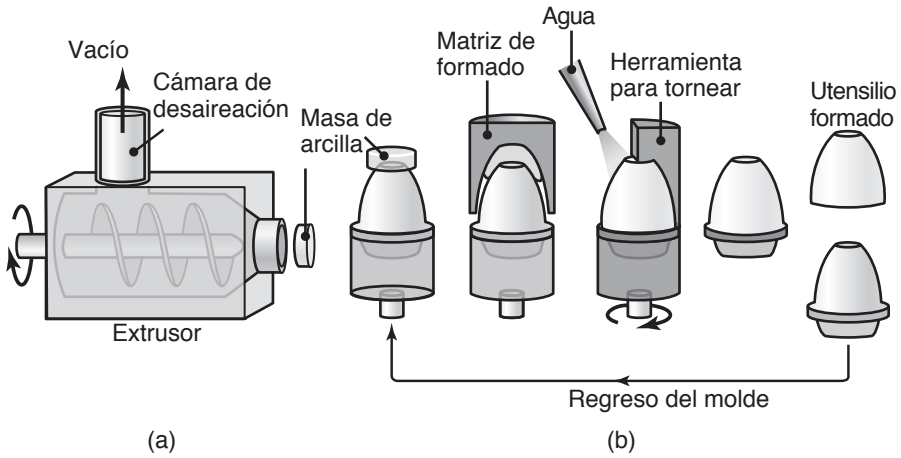


FIGURA 18.5 Operaciones de (a) extrusión y (b) torneado. *Fuente:* Según R. F. Stoops.

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.

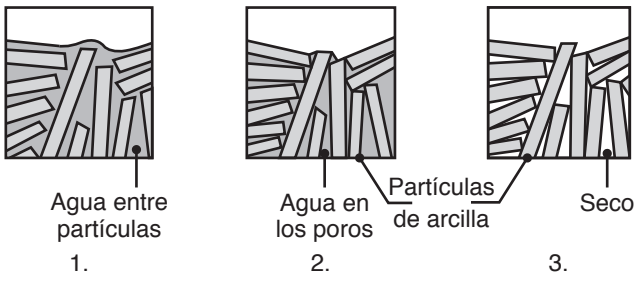


FIGURA 18.6 Contracción de la arcilla húmeda causada por la eliminación del agua durante el secado, la contracción puede ser hasta del 20% en volumen. *Fuente:* Según F. H. Norton.

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.

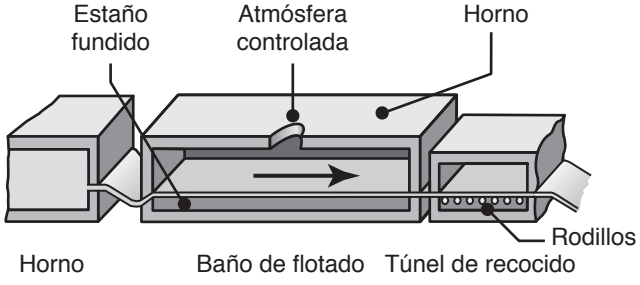


FIGURA 18.7 Método de flotado para la fabricación de vidrio plano.

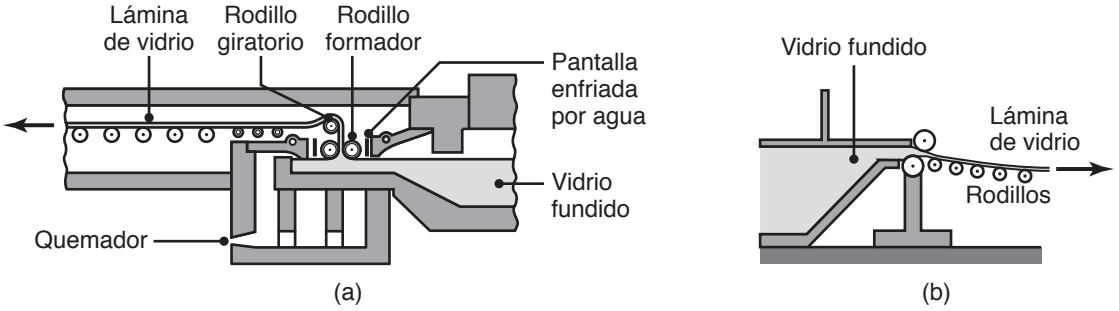


FIGURA 18.8 (a) Proceso de estirado para la fabricación de vidrio plano a partir de un baño fundido. (b) Proceso de laminado. *Fuente:* Según W. D. Kingery.

3. 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.

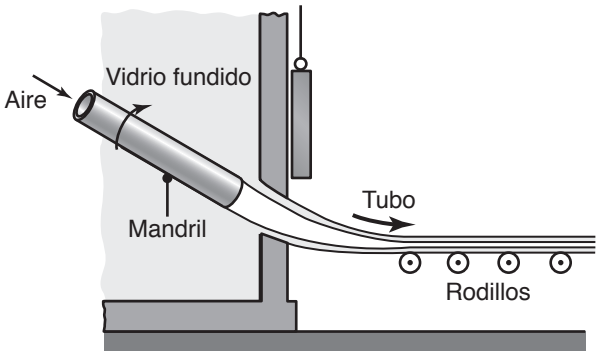


FIGURA 18.9 Proceso de manufactura para tubos de vidrio; se sopla aire a través del mandril para evitar que el tubo colapse; los tubos de vidrio para lámparas fluorescentes se hacen por este método.

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.

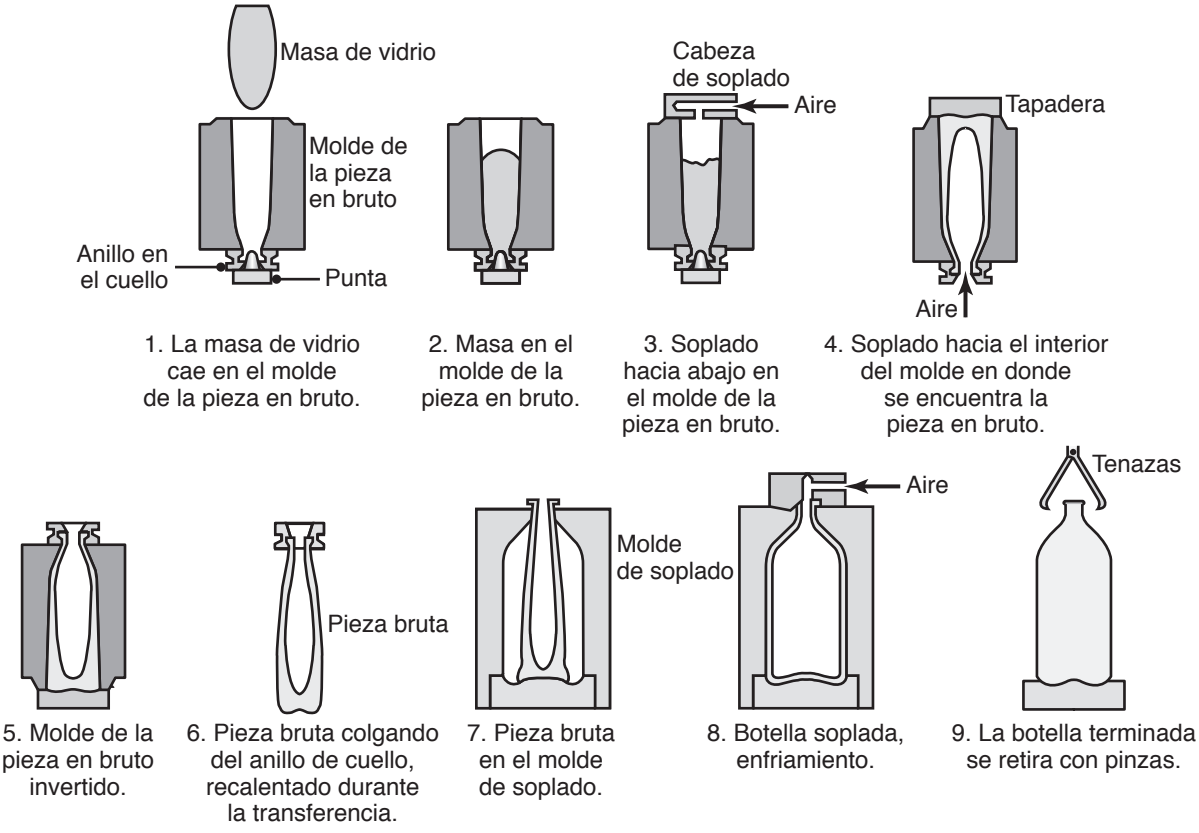


FIGURA 18.10 Pasos en la fabricación de una botella de vidrio ordinaria. *Fuente:* Según F. H. Norton.

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.

Código QR 18.1 Demostración de la producción de botellas de vidrio. (*Fuente:* Cortesía de Owens-Illinois, Inc.).

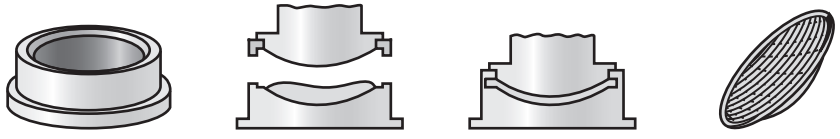


FIGURA 18.11 Manufactura de un artículo de vidrio mediante el prensado de vidrio fundido en un molde. *Fuente:* Con base en datos de Corning Glass Works.

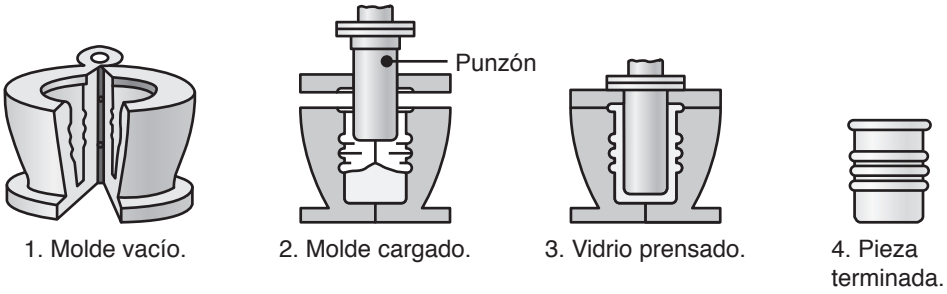


FIGURA 18.12 Prensado de vidrio fundido en un molde partido. *Fuente:* Según E. B. Shand.

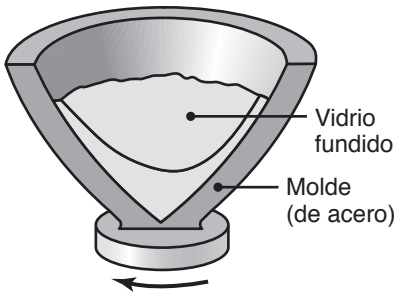


FIGURA 18.13 Colado centrífugo de vidrio; mediante este proceso, se hacen los grandes lentes de telescopio y tubos de cinescopio. *Fuente:* Con base en datos de Corning Glass Works.

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.

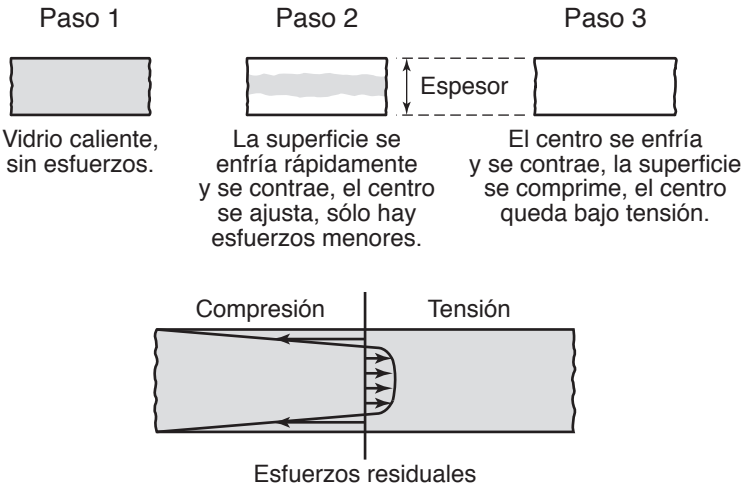


FIGURA 18.14 (a) Etapas en la inducción de esfuerzos residuales de compresión superficiales para mejorar la resistencia. (b) Esfuerzos residuales en una placa de vidrio templado. *Fuente:* Cortesía de Corning Glass Works.

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

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 °C o −321 °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 μm.
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 superconductora (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 compósito 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

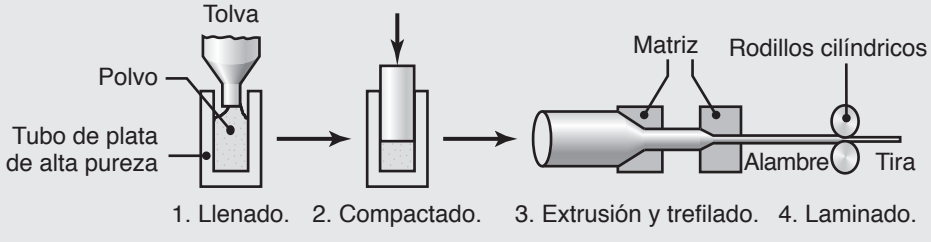


FIGURA 18.15 Ilustración esquemática del proceso de polvo en tubo.

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 moldeado 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? Descríbalos.
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 fracturaría 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_o, 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 moldeado.
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) polímeros 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, ráspelos 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.

CAPÍTULO

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

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 licuan los pellets.

Los tornillos tienen tres secciones distintas:

1. *Sección de alimentación*: transporta el material desde la tolva hasta la región central del barril.

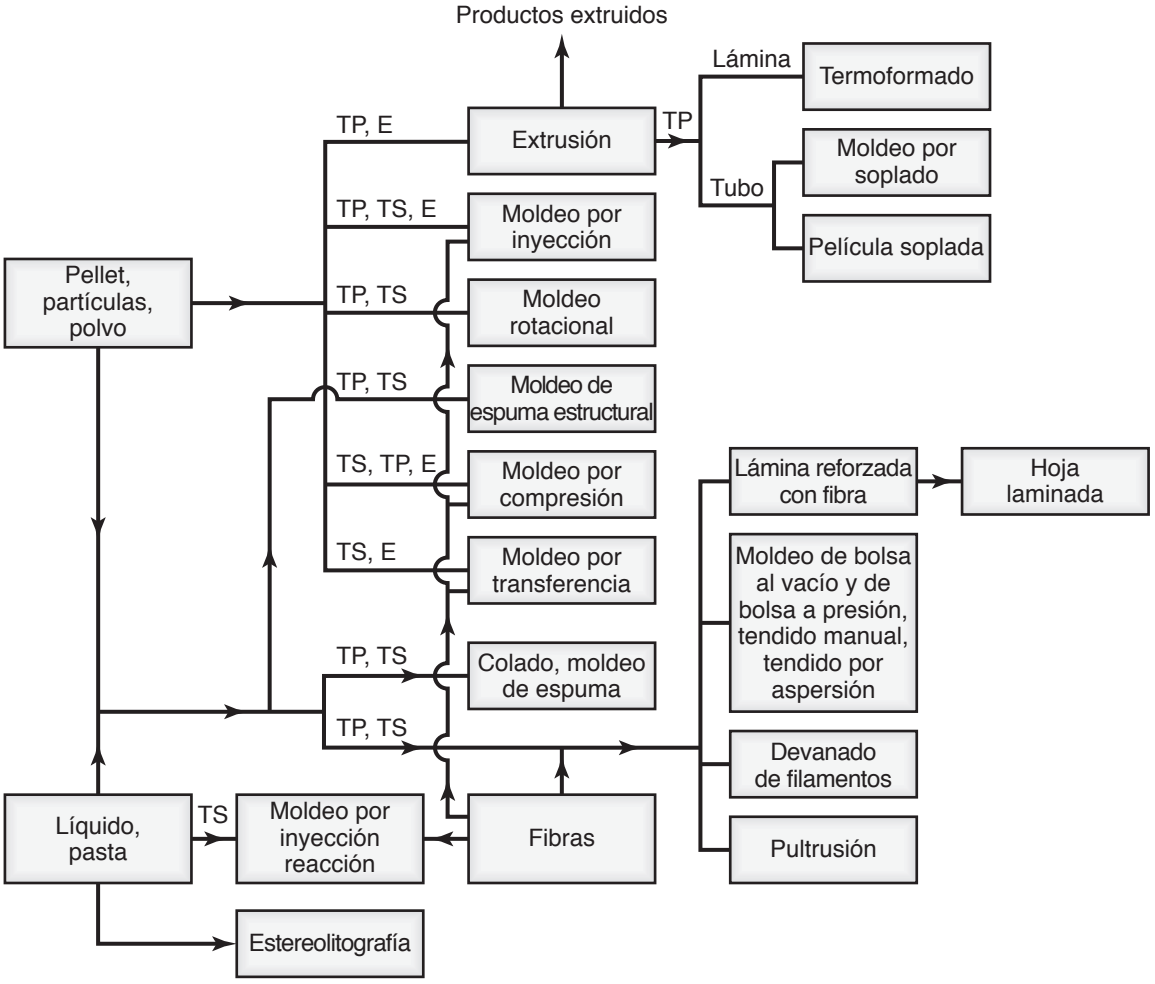


FIGURA 19.1 Esquema de los procesos de formado y de otros para dar forma a los plásticos, elastómeros y materiales compósitos. (TP significa termoplástico; TS, termofijo y E, elastómero).

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).

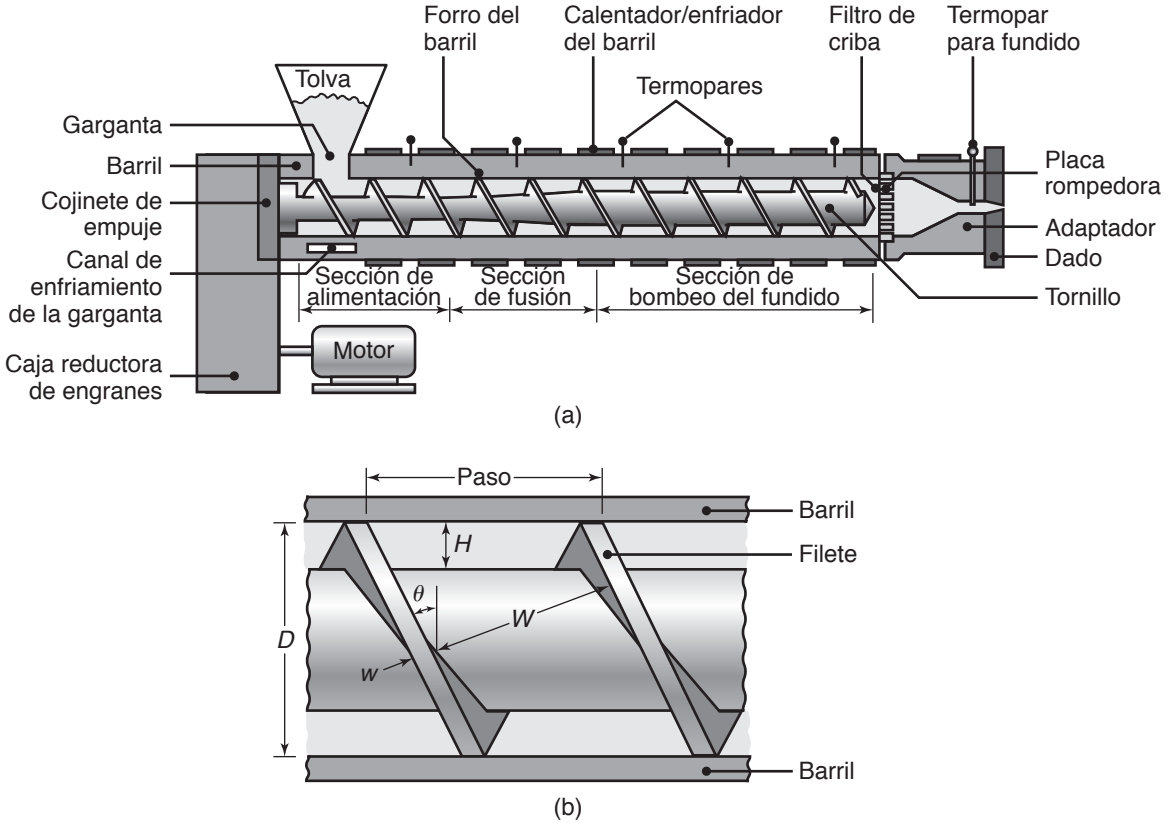


FIGURA 19.2 (a) Representación esquemática de un tornillo extrusor típico. (b) Geometría de un tornillo extrusor. Las formas complejas se pueden extruir con dados relativamente simples y de bajo costo.

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

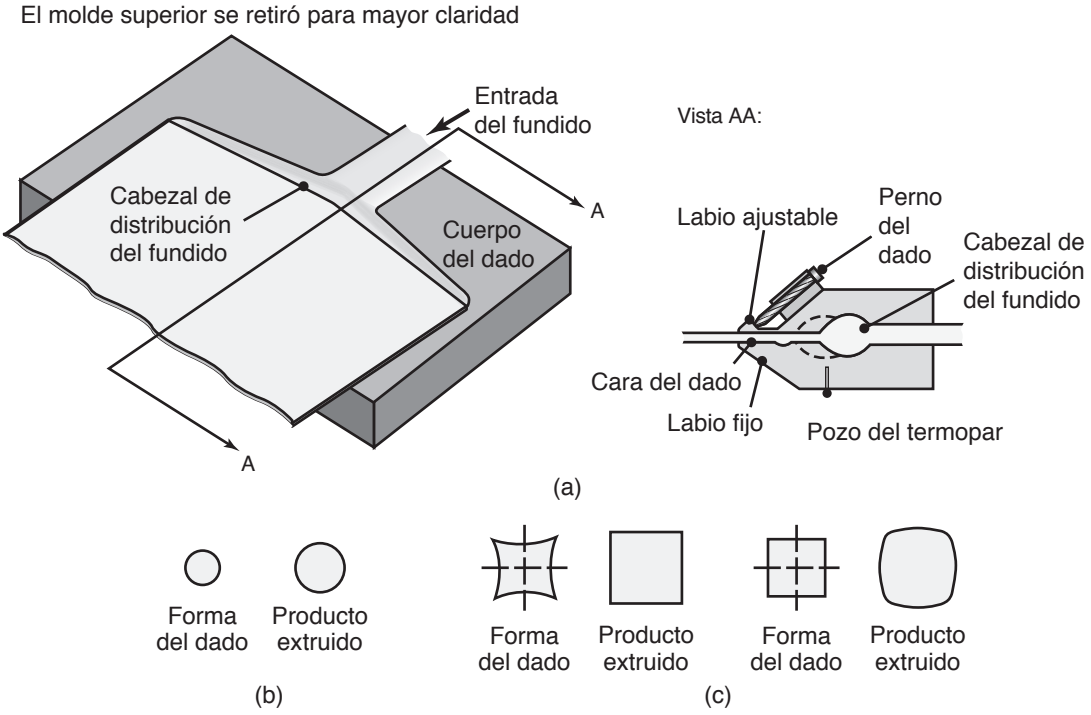


FIGURA 19.3 Geometrías comunes del dado de extrusión: (a) dado de percha recubierta para la extrusión de láminas; (b) dado redondo para la producción de varillas; (c) y (d) recuperación no uniforme de la pieza después de salir del dado.

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.

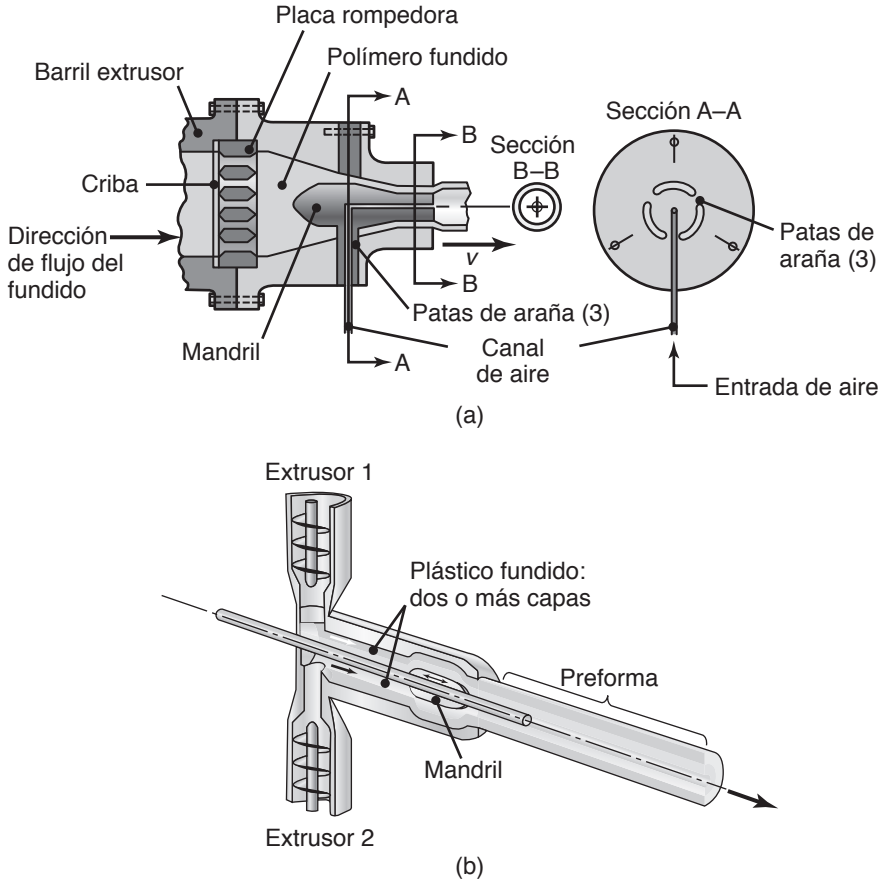


FIGURA 19.4 Extrusión de tubos. (a) Extrusión utilizando un dado de araña (vea también la figura 15.8) y aire a presión. (b) Coextrusión para producir una preforma para una botella de plástico.

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).

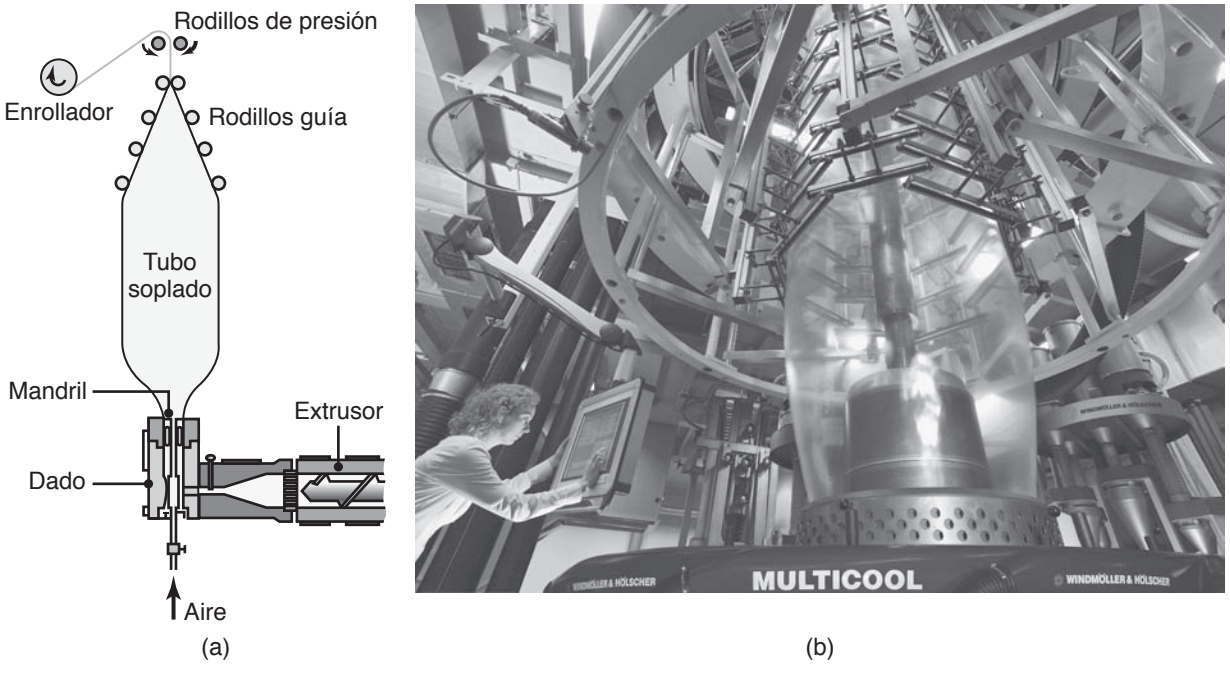


FIGURA 19.5 (a) Ilustración esquemática de la producción de películas delgadas y bolsas de plástico a partir de un tubo, fabricadas usando primero un extrusor y después el soplado por aire. (b) Operación de película soplada; este proceso está bien desarrollado y produce cantidades muy grandes de películas 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. Recuerde 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

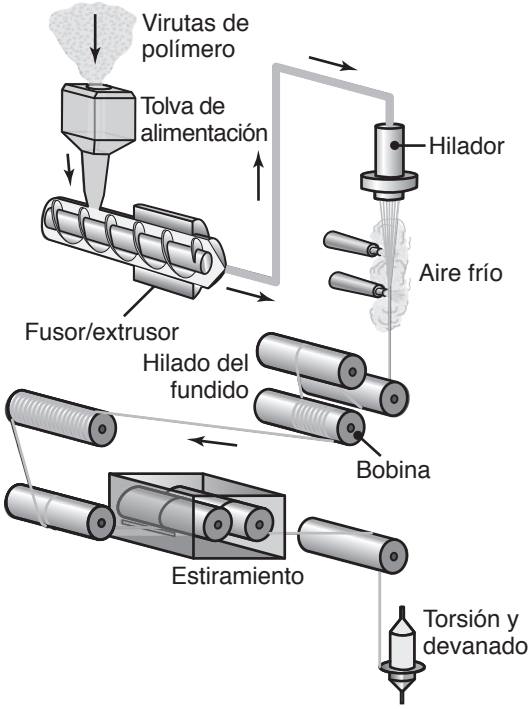


FIGURA 19.6 Proceso de hilado de un fundido para la producción de fibras poliméricas que se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo tejidos y refuerzos para materiales compósitos; en la caja de estiramiento, el rodillo derecho gira más rápido que el rodillo izquierdo.

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

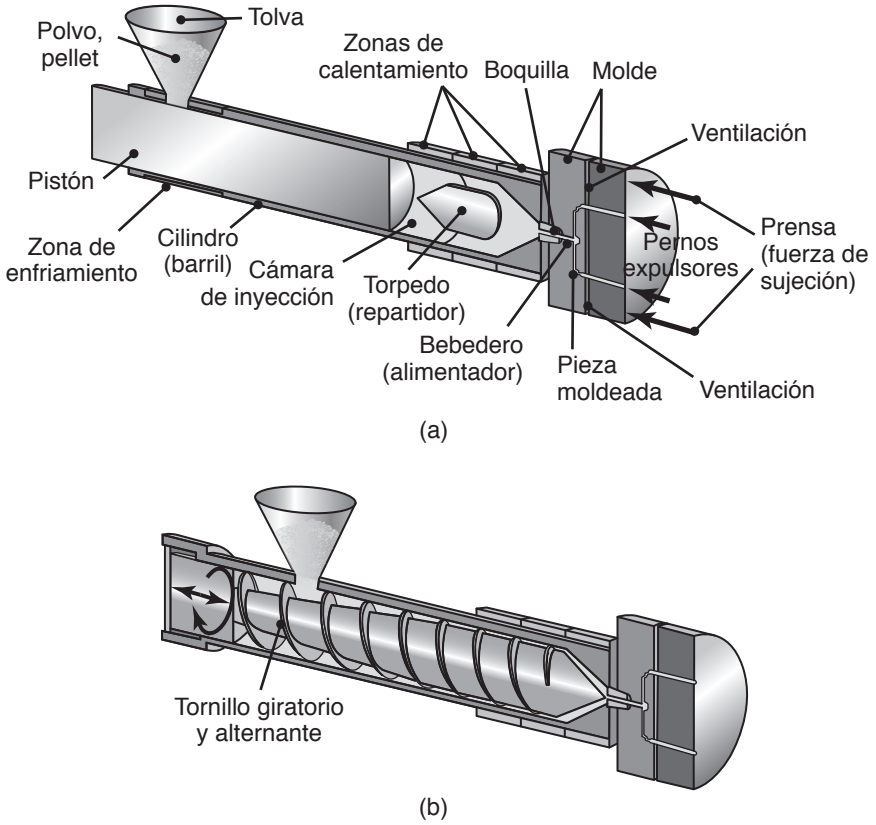


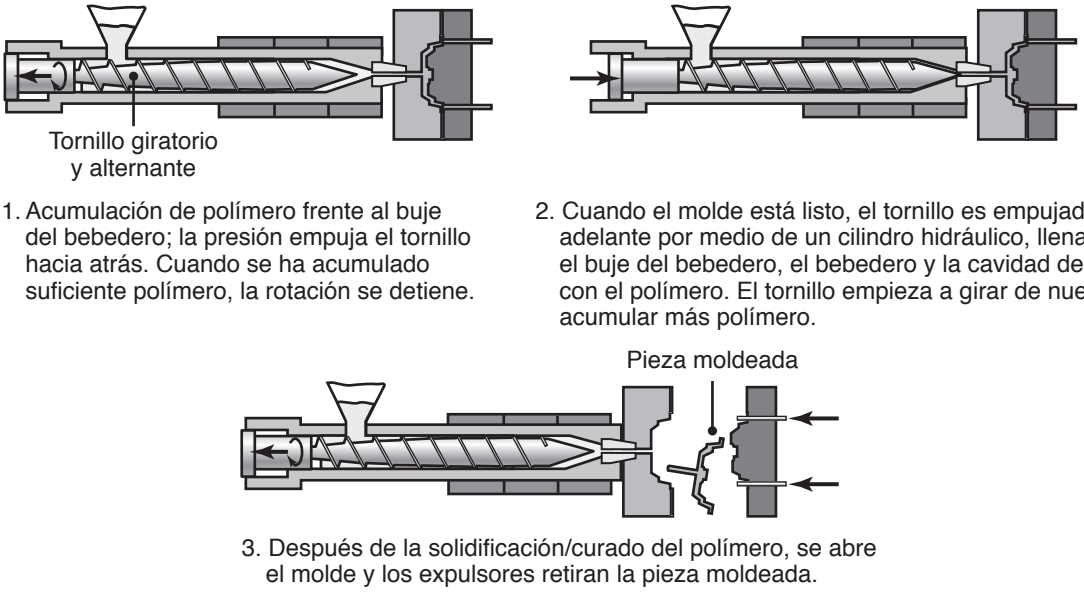
FIGURA 19.7 Ilustración esquemática del moldeo por inyección con (a) un émbolo y (b) un tornillo giratorio y alternante.

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:

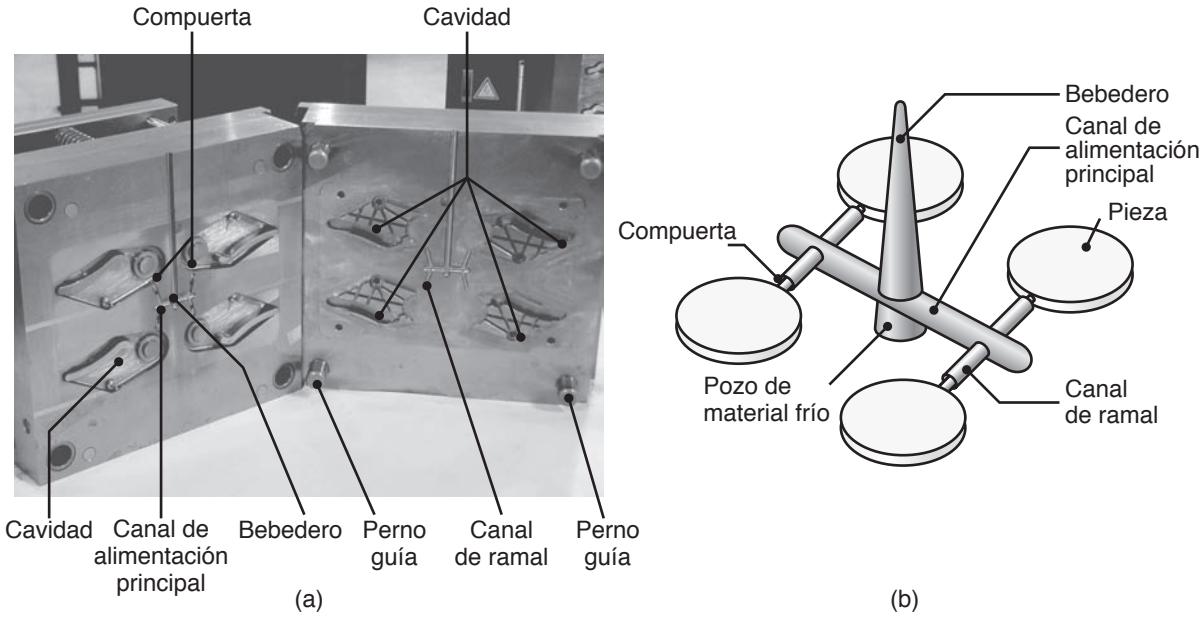


FIGURA 19.10 Ilustración de los componentes del molde para el moldeo por inyección. (a) Molde de dos placas con la identificación de los elementos más importantes. (b) Ilustración esquemática de los componentes de un molde. *Fuente:* Cortesía de Tooling Molds West, Inc.

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.

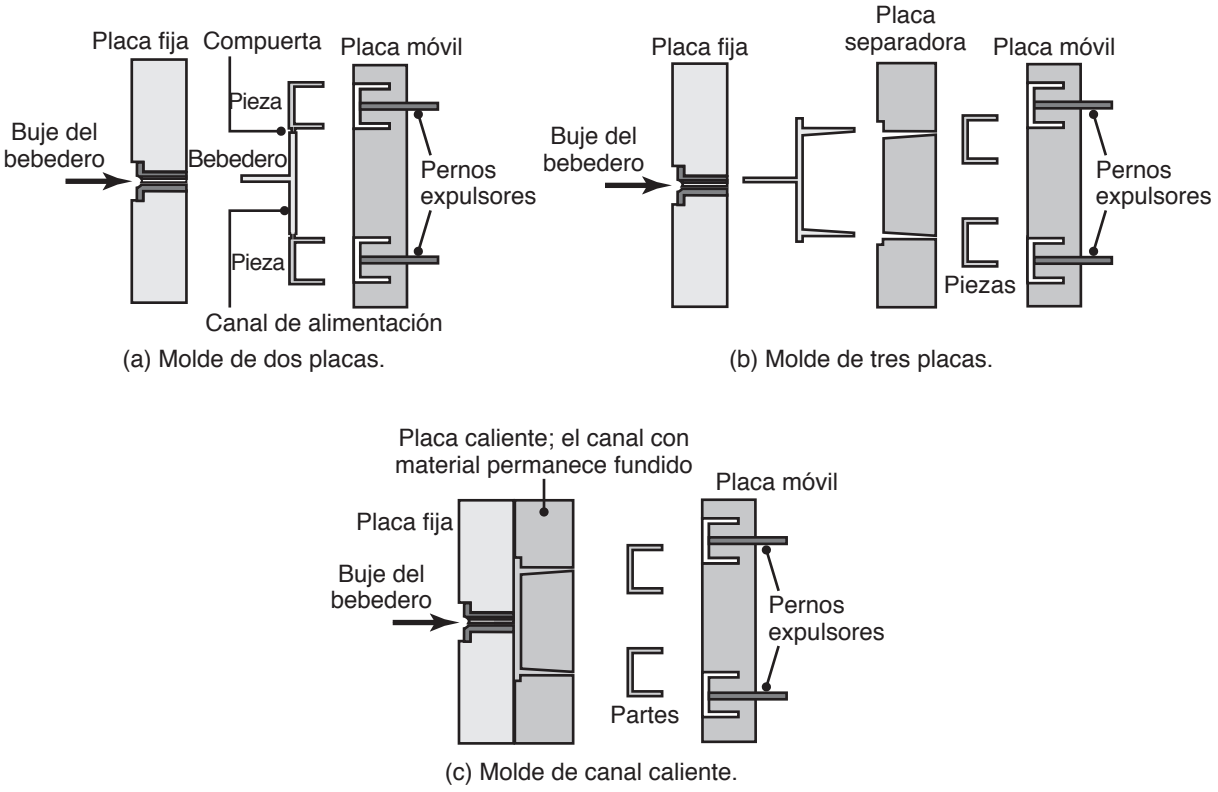


FIGURA 19.11 Tipos de moldes utilizados en el moldeo por inyección.

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.

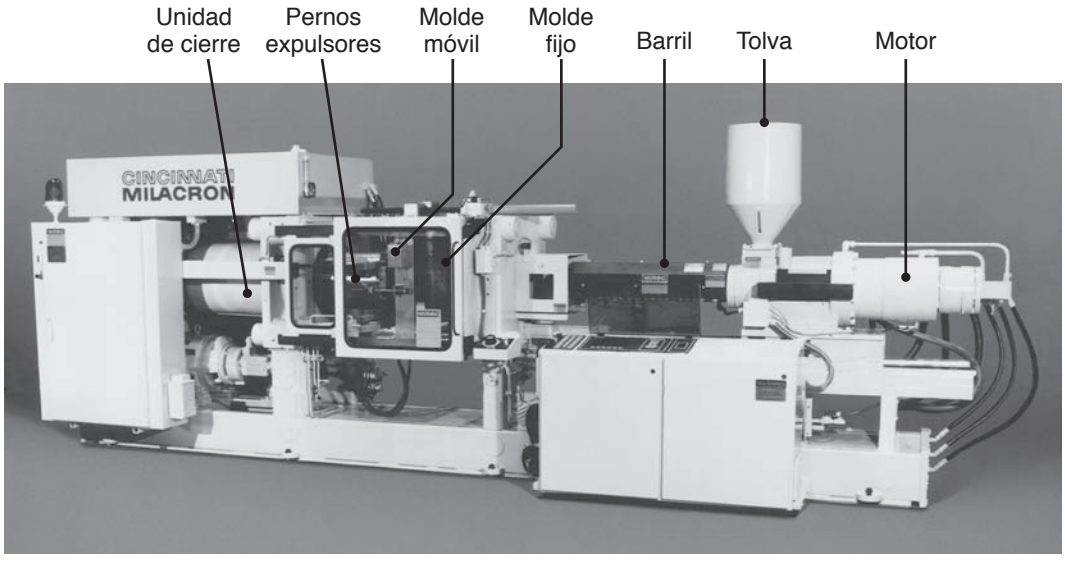


FIGURA 19.12 Máquina de moldeo por inyección de 2.2 MN (250 ton); el tonelaje es la fuerza aplicada para mantener los moldes cerrados durante la inyección del plástico fundido en las cavidades del molde y conservarlos así hasta que las piezas estén lo suficientemente frías y rígidas como para ser retiradas 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 $\pi(4.5)^2/4 = 15.9$ pulg^2. 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

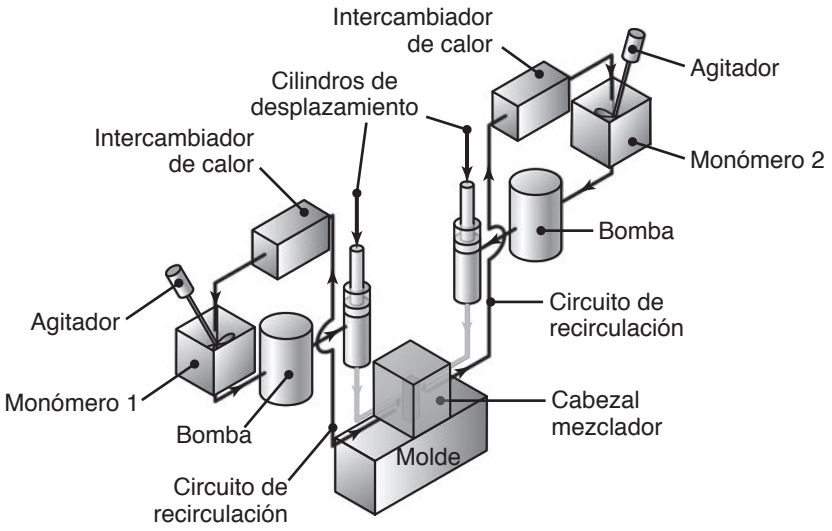


FIGURA 19.13 Ilustración esquemática del proceso de moldeo por inyección reacción; las piezas típicas que se fabrican son paneles para carrocerías de automóvil, esquíes acuáticos y aislamiento térmico para refrigeradores y congeladores.

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 soplo**, 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 soplo**, 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 politereterketona, 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.

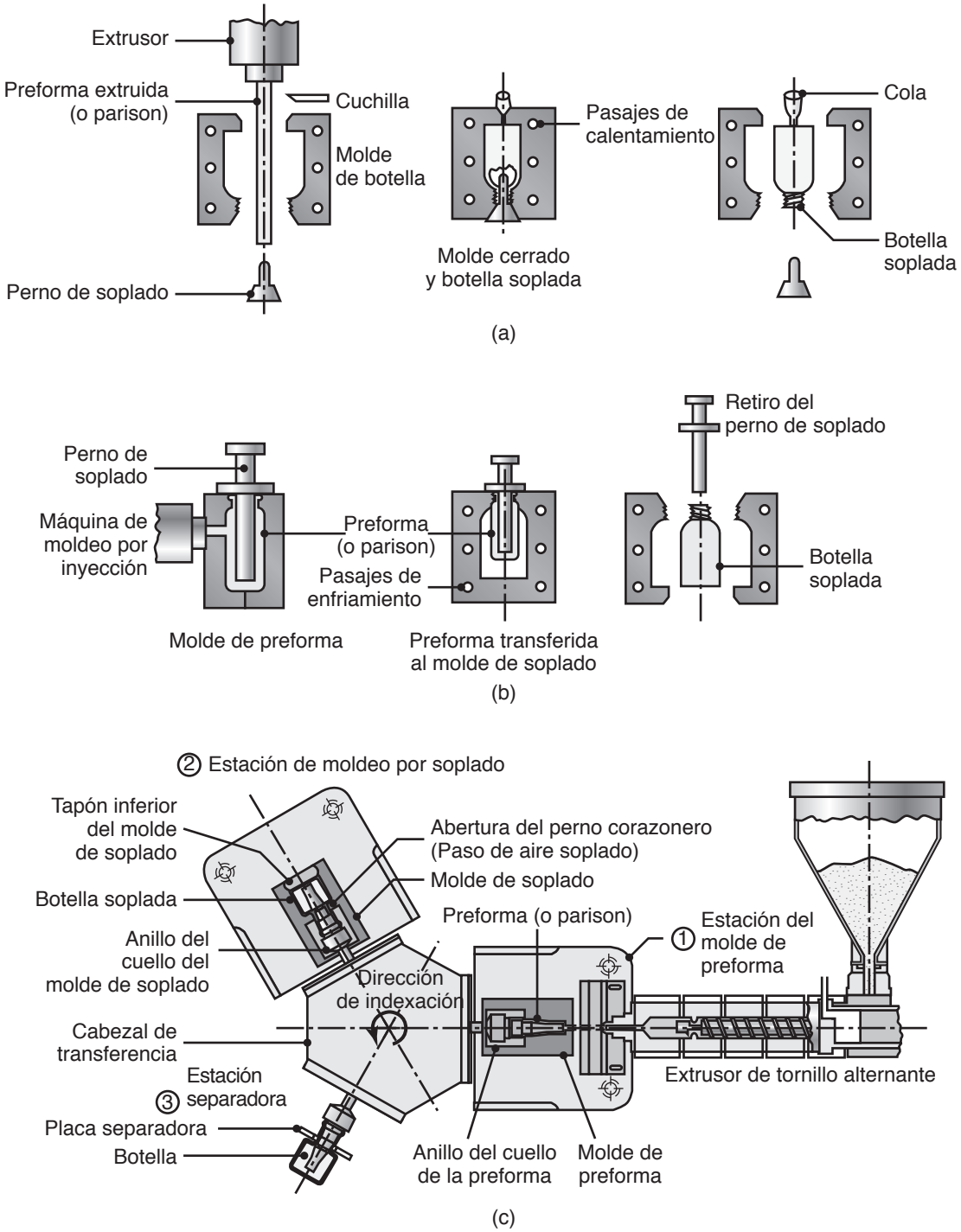


FIGURA 19.14 Ilustraciones esquemáticas de (a) el proceso de moldeo por extrusión soplo para la fabricación de botellas de plástico para bebidas; (b) el proceso de moldeo por inyección soplo; (c) máquina de moldeo por inyección soplo de tres estaciones para fabricar botellas de plástico.

Esta acción hace caer el polvo contra el molde, donde el calor lo fusiona, 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.

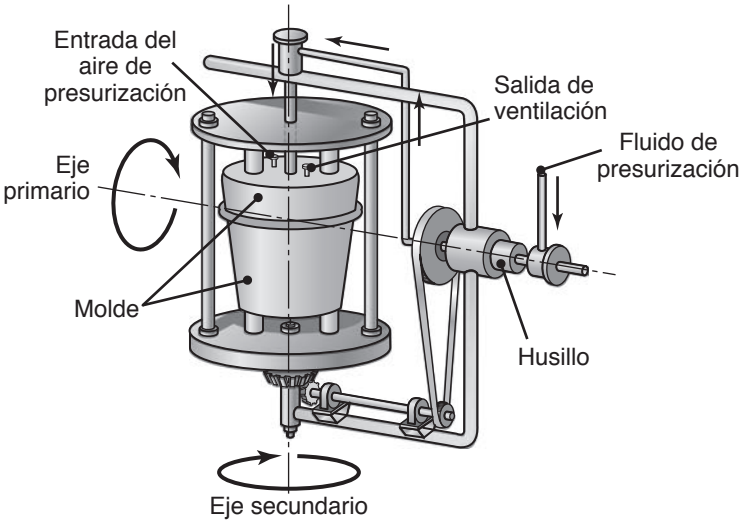


FIGURA 19.15 Proceso de moldeo rotacional (rotomoldeo o rotofundición); mediante este proceso se pueden hacer botes de basura, cubetas y balones de plástico.

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, maleteros, 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.

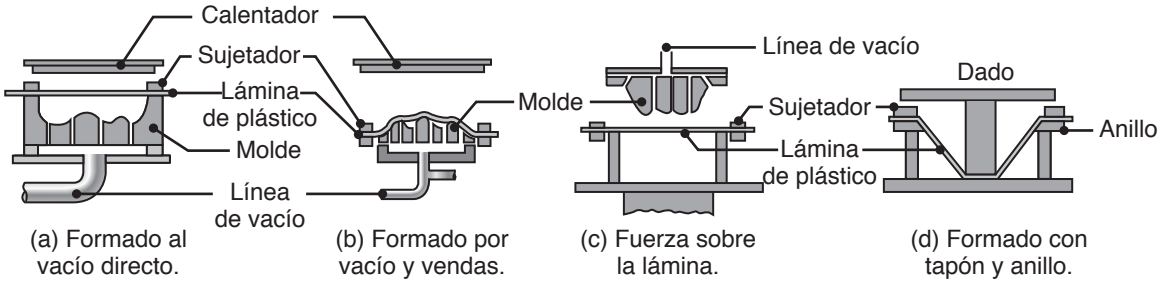


FIGURA 19.16 Diversos procesos de termoformado para lámina termoplástica; estos procesos se utilizan comúnmente en la fabricación de carteles publicitarios, bandejas para galletas y dulces, cabinas para ducha y empaques.

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.

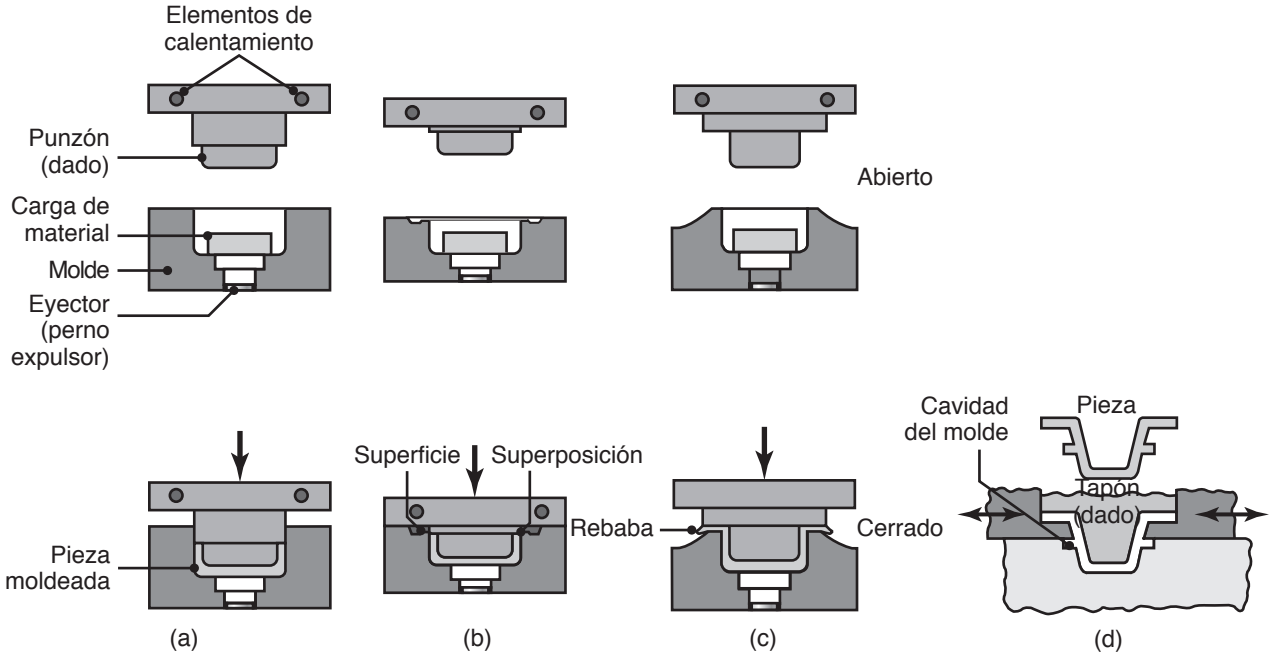


FIGURA 19.17 Tipos de moldeo por compresión, un proceso similar al forjado: (a) positivo; (b) semipositivo y (c) con rebaba, donde la rebaba se recorta posteriormente. (d) Diseño de molde para hacer una pieza moldeada por compresión con rebajos externos.

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.

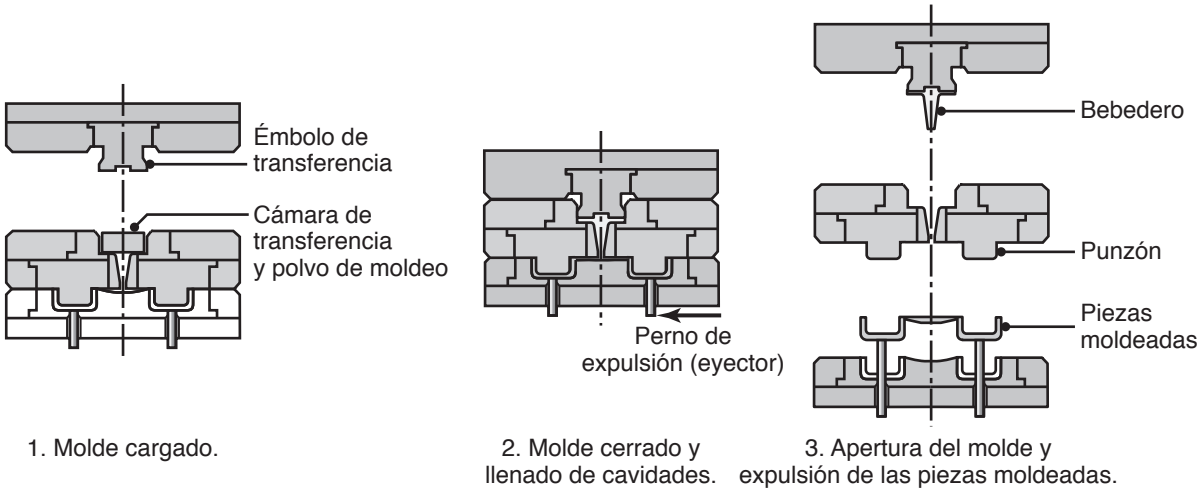


FIGURA 19.18 Secuencia de operaciones en el moldeo por transferencia para plásticos termofijos; este proceso es particularmente adecuado para piezas complejas con espesor de pared variable.

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.

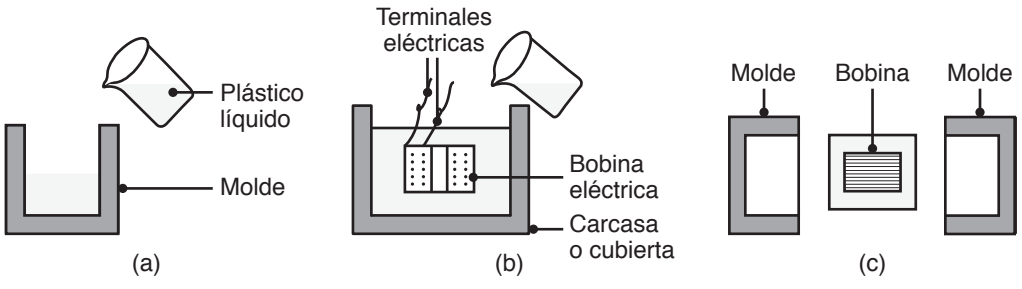


FIGURA 19.19 Ilustración esquemática de los procesos de (a) colado, (b) rellenado y (c) encapsulado de plásticos y ensambles eléctricos, donde el plástico circundante sirve como un dieléctrico.

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 moldeo 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.

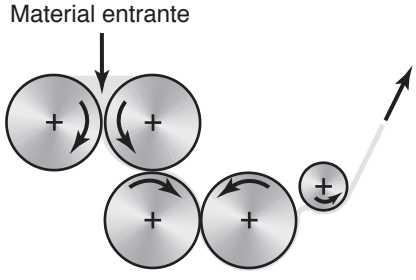


FIGURA 19.21 Ilustración esquemática del calandrado. Las láminas producidas por calandrado se utilizan posteriormente en termoformado; con este proceso también se manufacturan diversos productos de hule y elastómeros.

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.

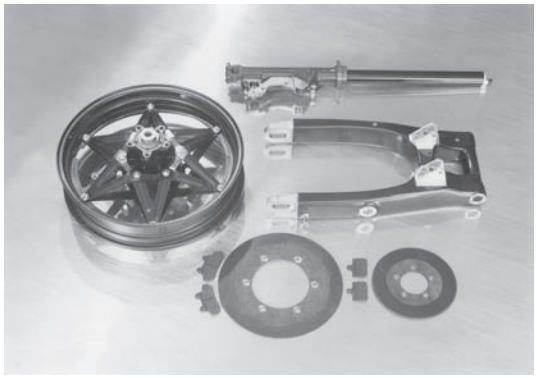


FIGURA 19.22 Componentes de plástico reforzado para una motocicleta Honda, las piezas que se muestran son las horquillas delantera y trasera, un brazo oscilante trasero, una rueda y los discos de frenado.

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

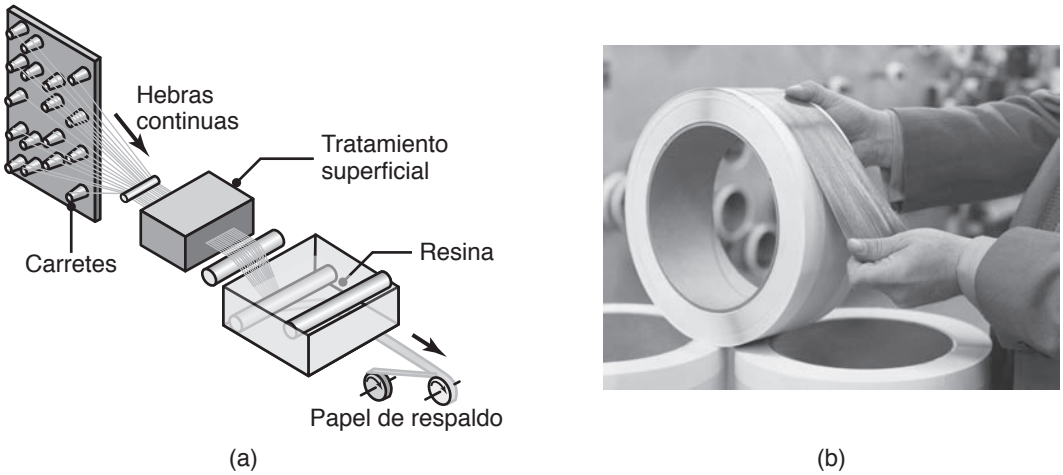


FIGURA 19.23 (a) Proceso de fabricación de cinta de material compósito con matriz polimérica. (b) Cinta preimpregnada de boro y epoxy. Estas cintas se utilizan en la fabricación de piezas y componentes de plástico reforzado que tienen altas relaciones de resistencia a peso y rigidez a peso; son particularmente 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.

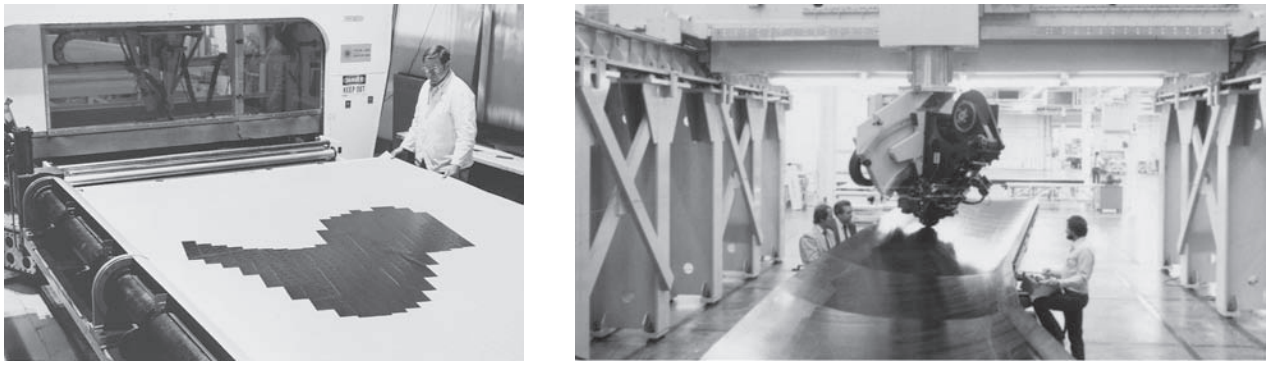


FIGURA 19.24 (a) Colocación de una cinta de boro y epoxy de una sola capa para el estabilizador horizontal de un avión de combate F-14. (b) Sistema de colocación de cinta de 10 ejes controlado numéricamente por computadora; esta máquina es capaz de colocar cintas de hasta 75 y 150 mm (3 y 6 pulg) de 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.

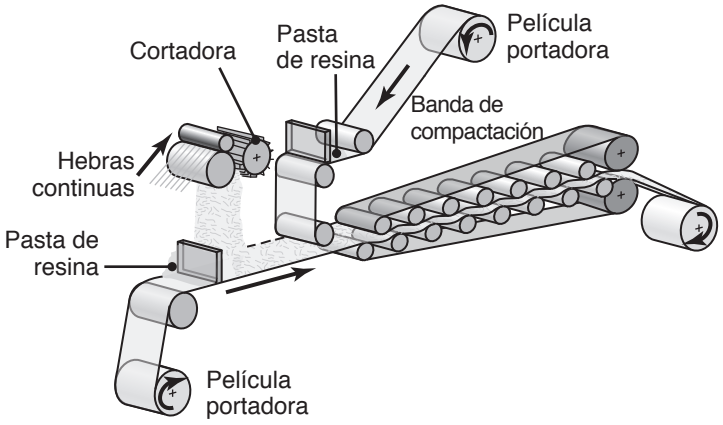


FIGURA 19.25 Ilustración esquemática del proceso de manufactura para la producción de láminas de plástico reforzadas con fibra; la lámina sigue siendo viscosa en esta etapa y posteriormente puede formarse en diversos productos. *Fuente:* Según T.-W. Chou, R. L. McCullough y R. B. Pipes.

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).

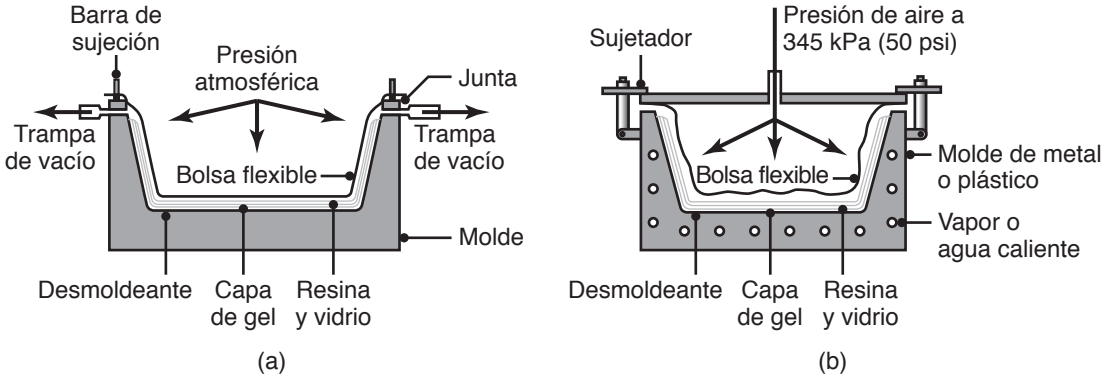


FIGURA 19.26 Ilustración esquemática de (a) el moldeo por bolsa al vacío y (b) el moldeo por bolsa a presión; estos procesos se utilizan en la fabricación de piezas discretas de plástico reforzado. *Fuente:* Según T. H. Meister.

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 ducha 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

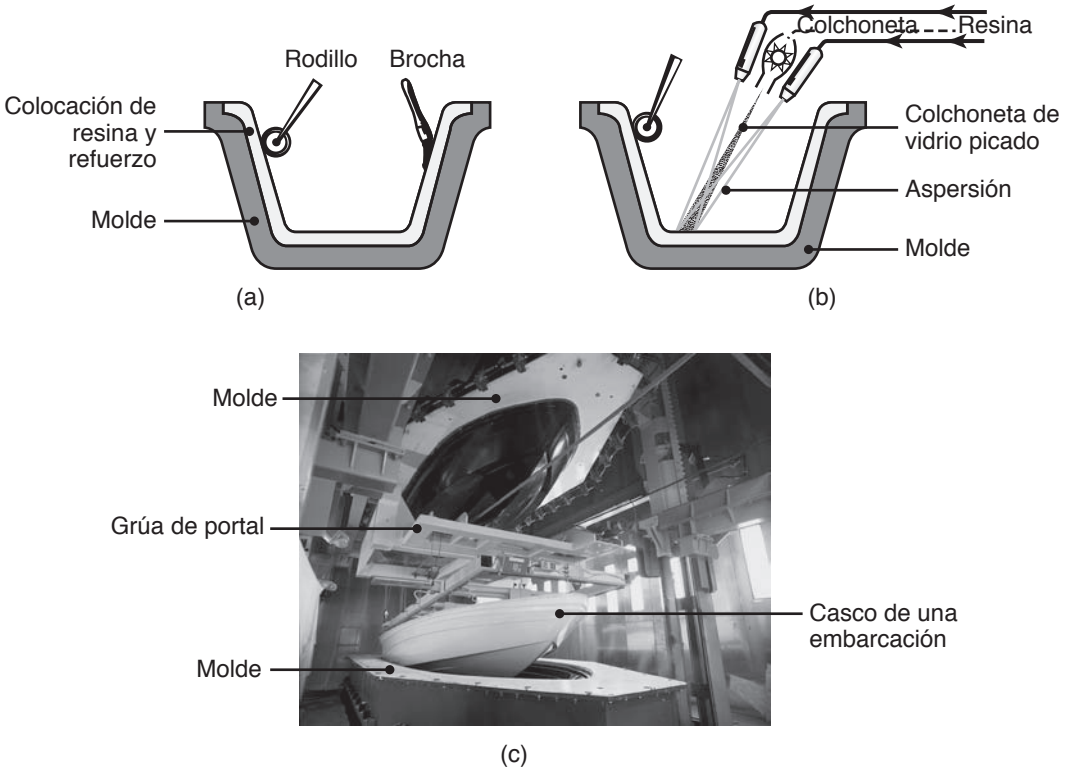


FIGURA 19.27 Métodos manuales de procesamiento de plásticos reforzados con: (a) colocación manual y (b) colocación por aspersión. Observe que, a pesar de que el proceso es lento, sólo se necesita un molde. Las figuras muestran un molde hembra, pero también se usan moldes macho; estos métodos también 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 herramentales 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-

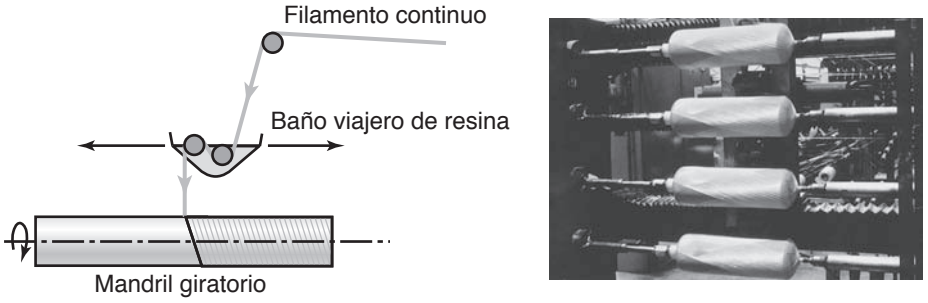


FIGURA 19.28 (a) Ilustración esquemática del proceso de devanado de filamentos; (b) fibra de vidrio devanada sobre forros de aluminio para recipientes inflables deslizantes en el avión Boeing 767. Los productos fabricados por este proceso tienen una alta relación de resistencia a peso y también sirven como recipientes a presión de peso ligero. *Fuente:* Cortesía de Brunswick Corporation.

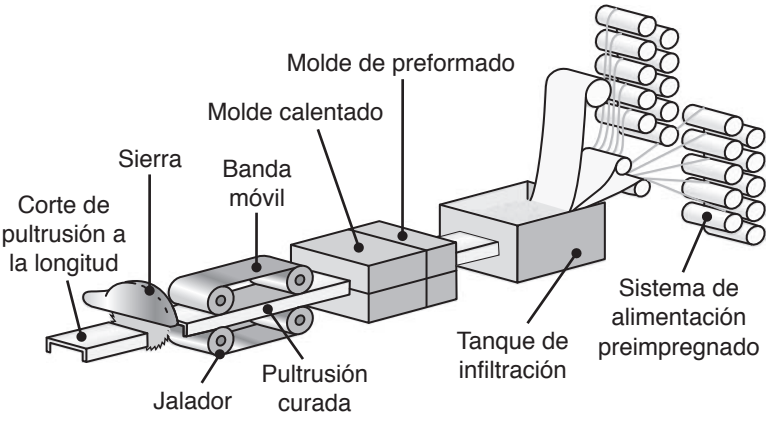
zos se impregnan haciéndolos pasar a través de un baño de polímero. El devanado de filamentos se puede modificar mediante el uso de un material preimpregnado, como una cinta, para envolver el mandril.

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 compósito 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.



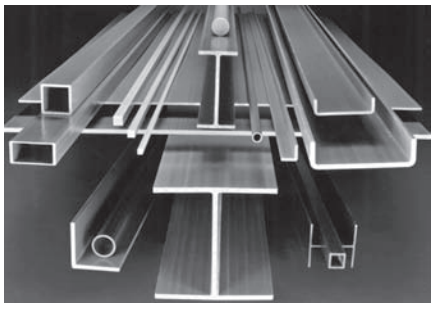


FIGURA 19.29 (a) Ilustración esquemática del proceso de pultrusión. (b) Ejemplos de piezas fabricadas por pultrusión. Los componentes principales de las escaleras de fibra de vidrio (utilizadas especialmente por los electricistas) se hacen mediante este proceso; están disponibles en diferentes colores, 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 $\pm 30°$ 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.

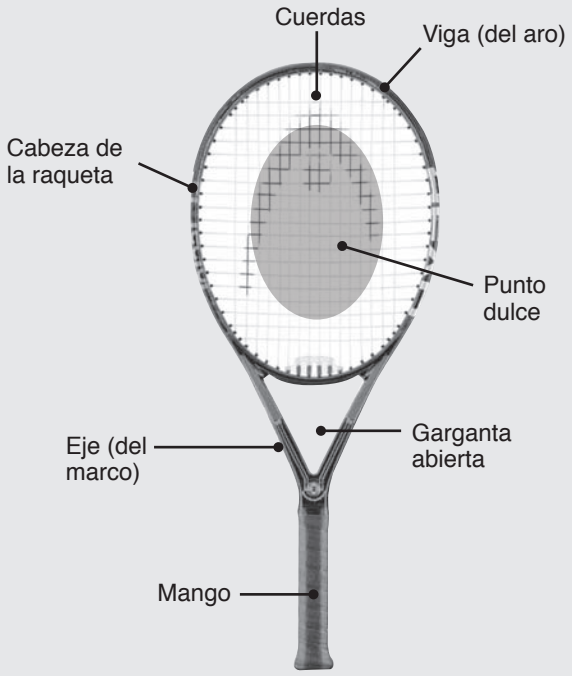


FIGURA 19.30 Raqueta de tenis Head Protector. *Fuente:* Cortesía de Head Sport AG.

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.

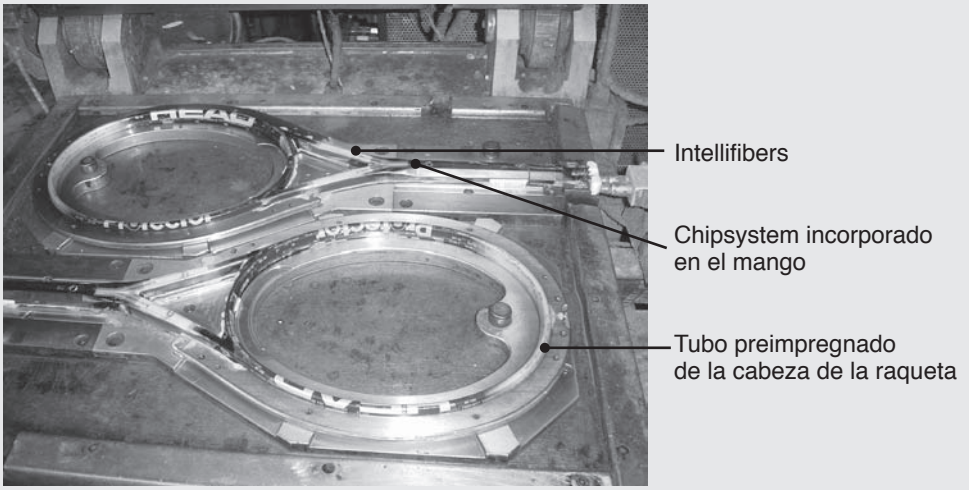
La manufactura de una raqueta de tenis Protector implica una serie de pasos. Primero se produce un material epóxico preimpregnado de carbono, como se describe en la sección 19.13.1. El preimpregnado se corta al tamaño apropiado y se coloca en una prensa plana calentada para que el material de la matriz 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

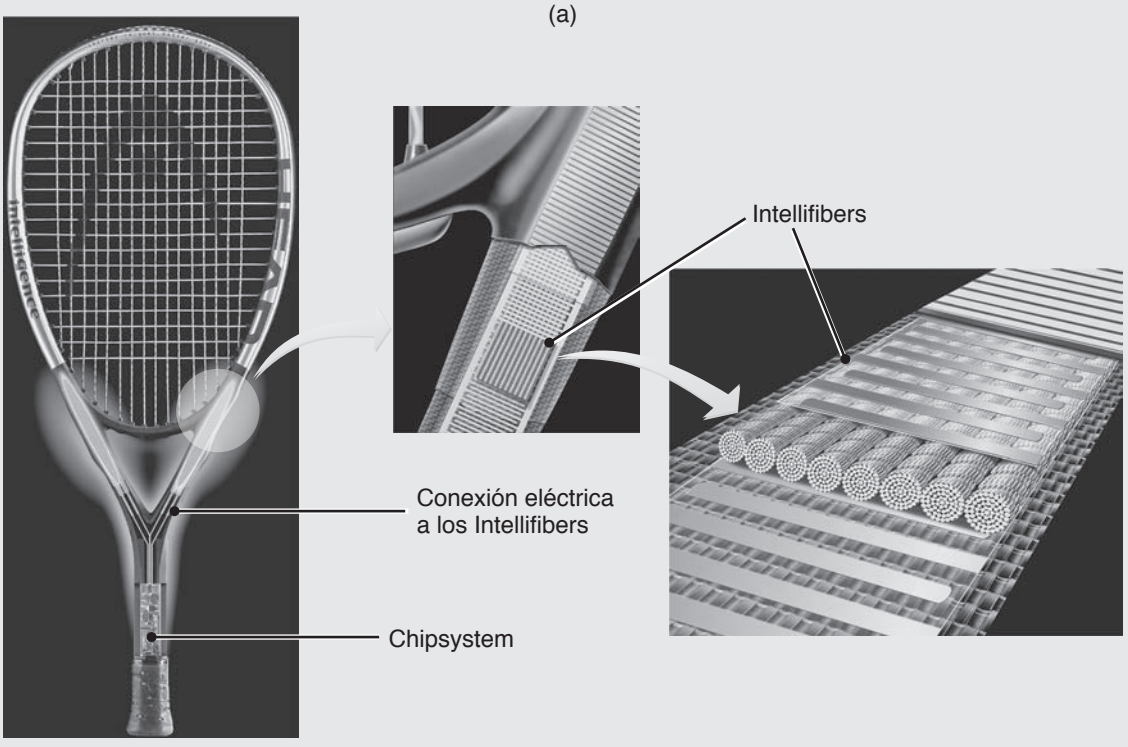
(*continúa*)

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 compósito, 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 cuerdas 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 compósito 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 compósito 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 compósito 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 bloques 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

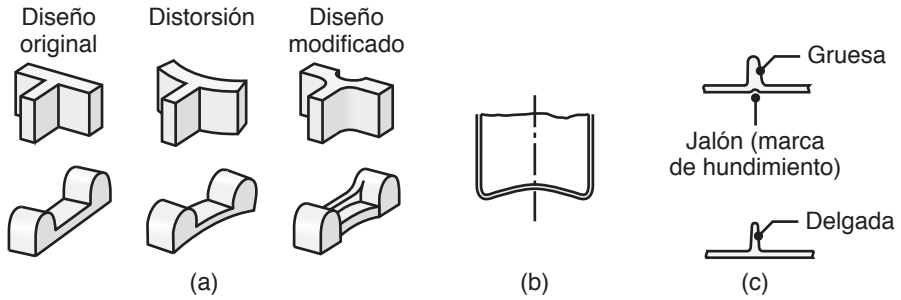


FIGURA 19.32 Ejemplos de modificaciones de diseño para eliminar o minimizar la distorsión en piezas de plástico: (a) cambios de diseño sugeridos para minimizar la distorsión; (b) incremento en la rigidez de los fondos de recipientes de plástico delgados mediante el diseño de domos, una técnica similar 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 compósito (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 compósito 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
Coextrusión
Colado
Colocación manual
Colocación por aspersión
Compuesto de moldeo de láminas
Compuesto de moldeo grueso
Compuesto de moldeo volumétrico
Dado de percha recubierta
Devanado de filamentos
Encapsulado
Encolado
Extrusión
Formado en fase sólida
Formado en frío
Hilado
Hilado por fusión
Hilador

Hinchamiento
Infiltración de barbotina
Infiltración de vapor químico
Marcas de hundimiento
Masticado
Moldeo con insertos
Moldeo de espuma
Moldeo de espuma estructural
Moldeo en hielo
Moldeo en hueco
Moldeo por bolsa al vacío
Moldeo por compresión
Moldeo por contacto
Moldeo por extrusión soplo
Moldeo por inyección
Moldeo por inyección reacción
Moldeo por soplado
Moldeo por transferencia
Moldeo por transferencia de resina
Moldeo rotacional (rotomoldeo)
Pellet
Plastisol
Preforma
Preimpregnados
Procesamiento a molde abierto
Procesamiento en dos fases
Procesamiento en fase líquida
Procesamiento en fase sólida
Pulformado
Pultrusión
Relación de soplado
Rellenado
Síntesis química
Sobremoldeo
Termoformado

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.

Tadmore, 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 realzadas 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 herramentales 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 herramentales 553

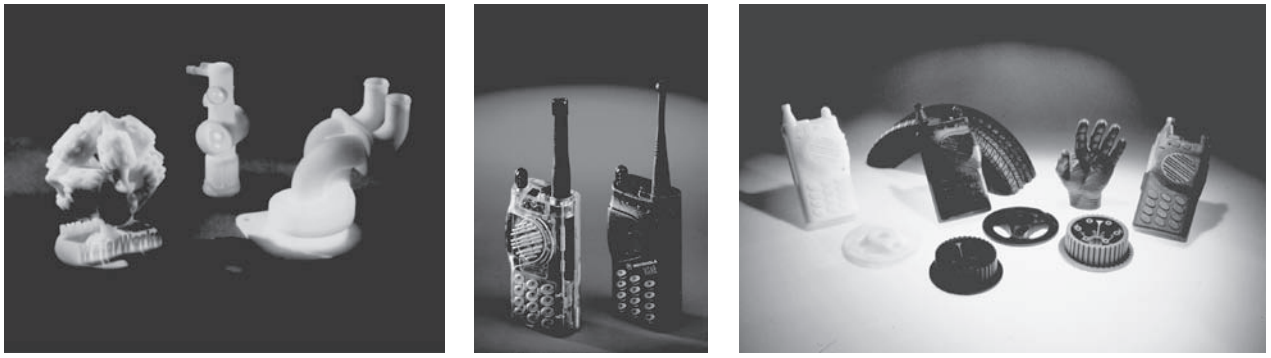
CASOS DE ESTUDIO:

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 herramentales 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 herramentales 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.



(a) (b) (c)

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.).

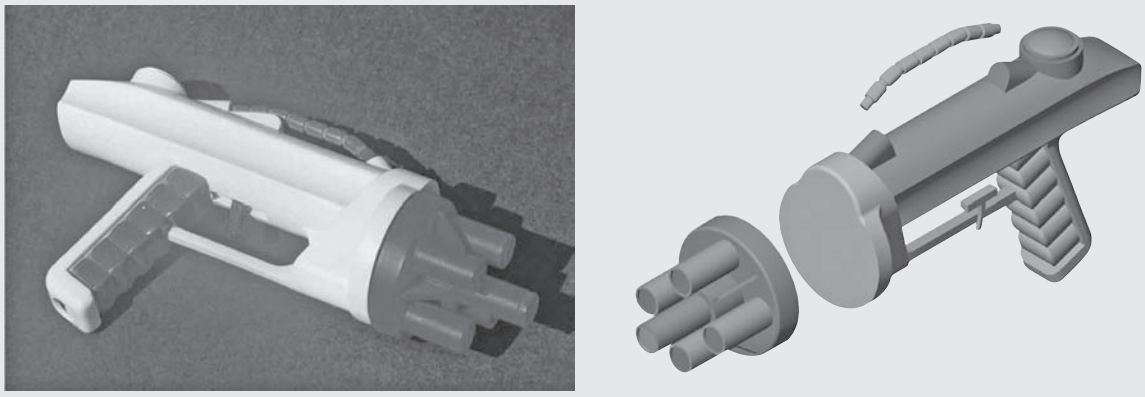
Una preocupación aún más importante es la velocidad con la que un producto fluye desde el concepto hasta un artículo comercializable. En un mercado competitivo, es bien sabido que los productos introducidos antes que sus competidores suelen ser más rentables y disfrutar de mayor participación de mercado. 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 computadora (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.



(a) (b)

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 herramentales reales para las operaciones de manufactura (**creación rápida de herramentales**, consulte la sección 20.6.1), por lo que es posible hacer los herramentales 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 herramentales.
	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	Disponible 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	Disponible 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.

20.3.1 Modelado por deposición fundida

Código QR 20.2 Modelado por deposición fundida. (*Fuente:* Cortesía de Stratasys, Inc.).

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-

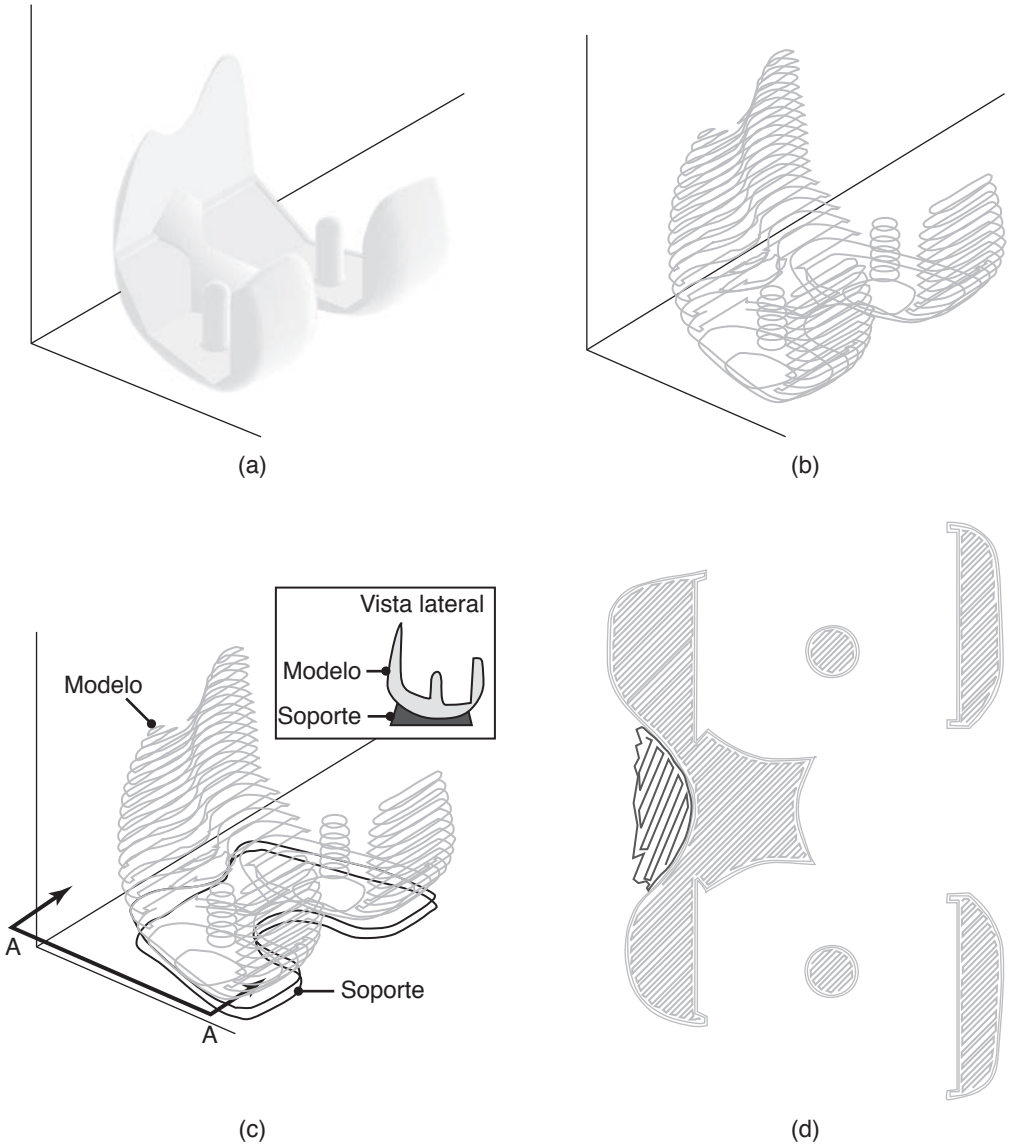


FIGURA 20.3 Pasos computacionales en la producción de un archivo de estereolitografía (STL, por sus términos en inglés), vea también la figura 38.5. (a) Descripción tridimensional de la pieza. (b) La pieza se divide en cortes: sólo se muestra 1 de 10. (c) Se planea el material de soporte a utilizar. (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.

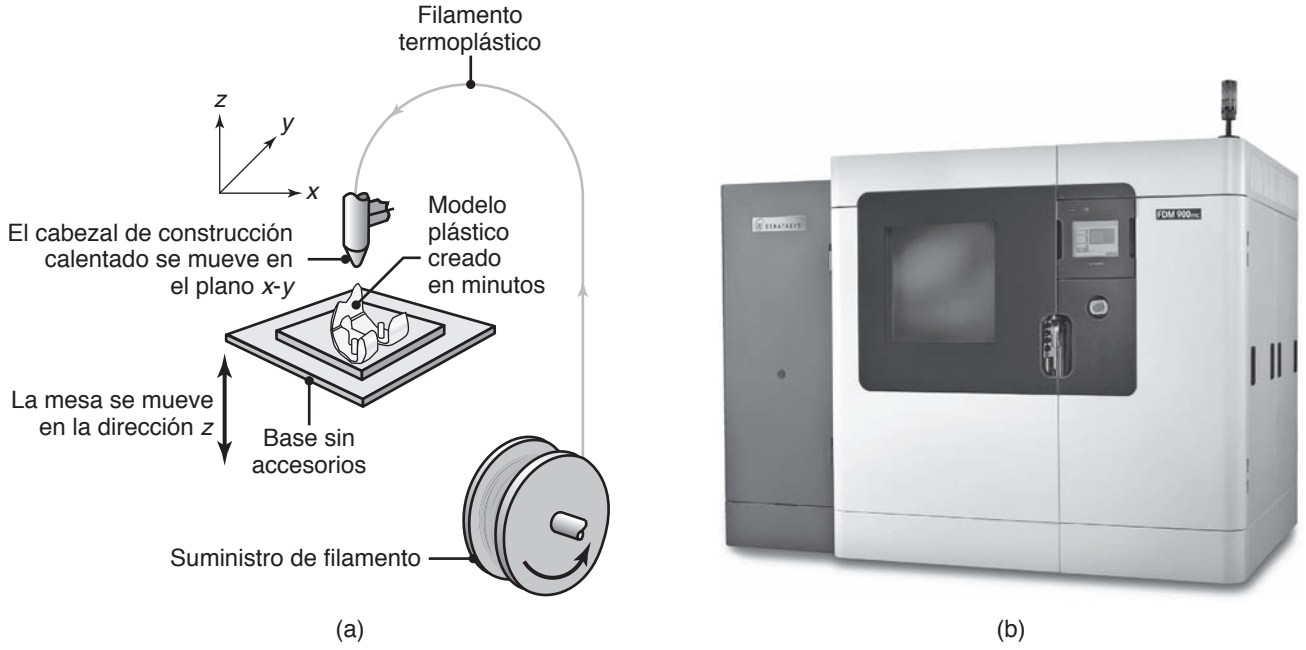


FIGURA 20.4 (a) Ilustración esquemática del proceso de modelado por deposición fundida. (b) La FDM 900mc es una máquina de modelado por deposición fundida. *Fuente:* Cortesía de Stratasys, Inc.

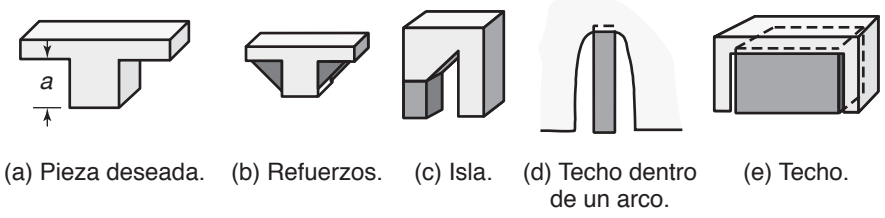


FIGURA 20.5 (a) Pieza con una sección saliente que requiere material de soporte. (b) a (e) Estructuras de soporte comúnmente utilizadas en las máquinas de prototipado rápido. Las zonas grises representan el material de soporte. *Fuente:* Reutilizada con autorización de la Society of Manufacturing Engineers.

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*.

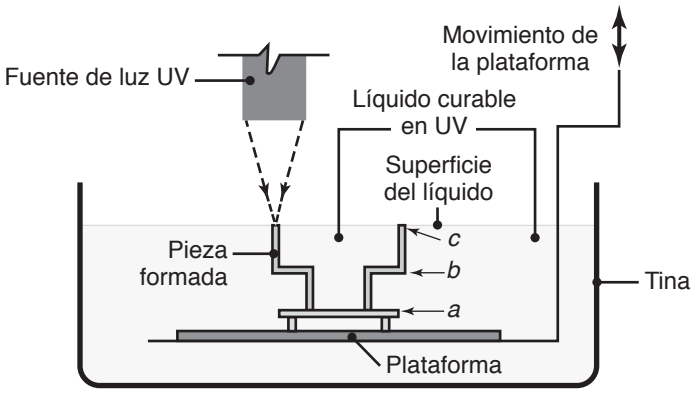


FIGURA 20.6 Ilustración esquemática del proceso de estereolitografía.

Código QR 20.3 Proceso de estereolitografía. (*Fuente:* Cortesía de 3D Systems).

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 escaneado 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 panal 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).

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 μm (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 una envolvente de hasta 500 mm $\times$ 400 mm $\times$ 200 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).

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).

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

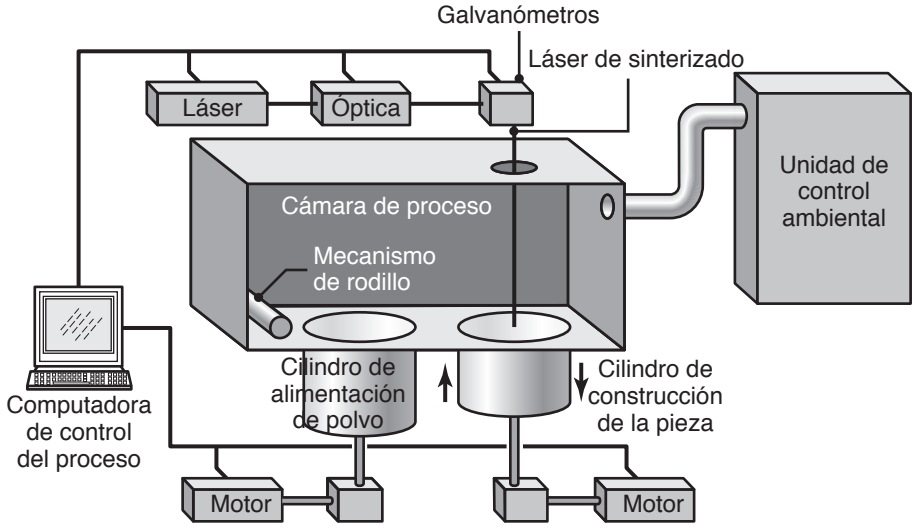


FIGURA 20.8 Ilustración esquemática del proceso de sinterizado selectivo por láser. *Fuente:* Según C. Deckard y P. F. McClure.

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 mm × 200 mm × 180 mm (8 pulg × 8 pulg × 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 cm^3/h (3.7 $pulg^3$/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

Código QR 20.6 Prototipado rápido a color con impresión tridimensional. (*Fuente:* Cortesía de 3D Systems).

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 fusiona con un aglutinante de sílice.

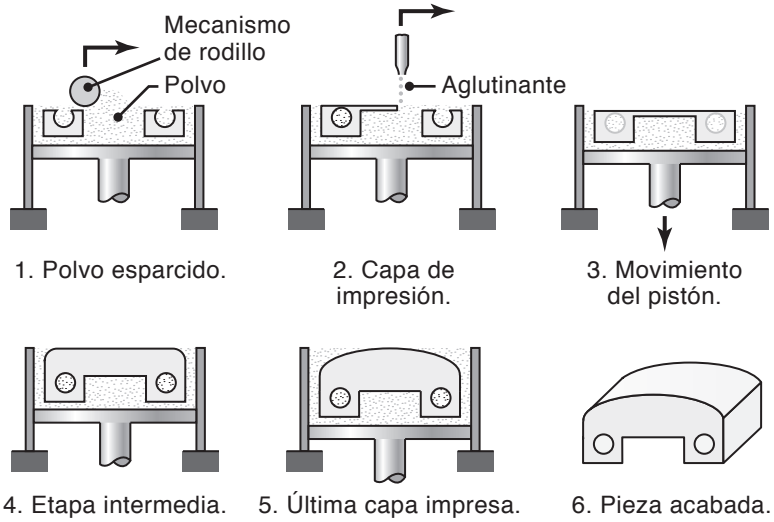


FIGURA 20.9 Ilustración esquemática del proceso de impresión tridimensional. *Fuente:* Según E. Sachs y M. Cima.

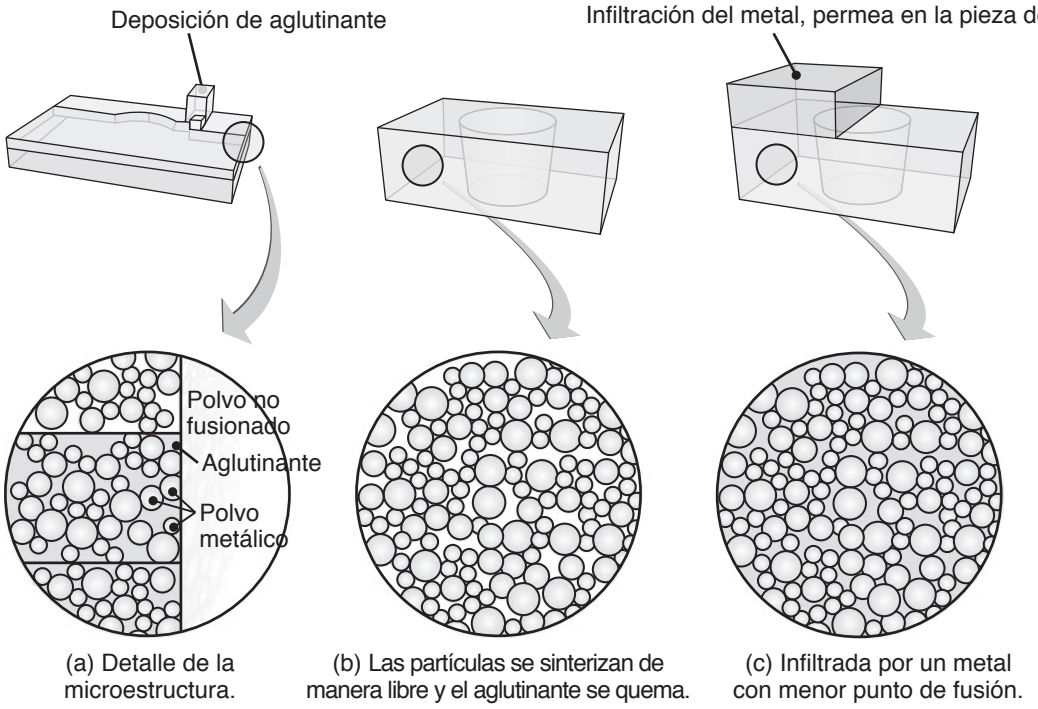


FIGURA 20.10 Impresión tridimensional usando (a) construcción de la pieza, (b) sinterizado y (c) medidas de infiltración para producir piezas metálicas. *Fuente:* Cortesía de The ExOne Company.

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).

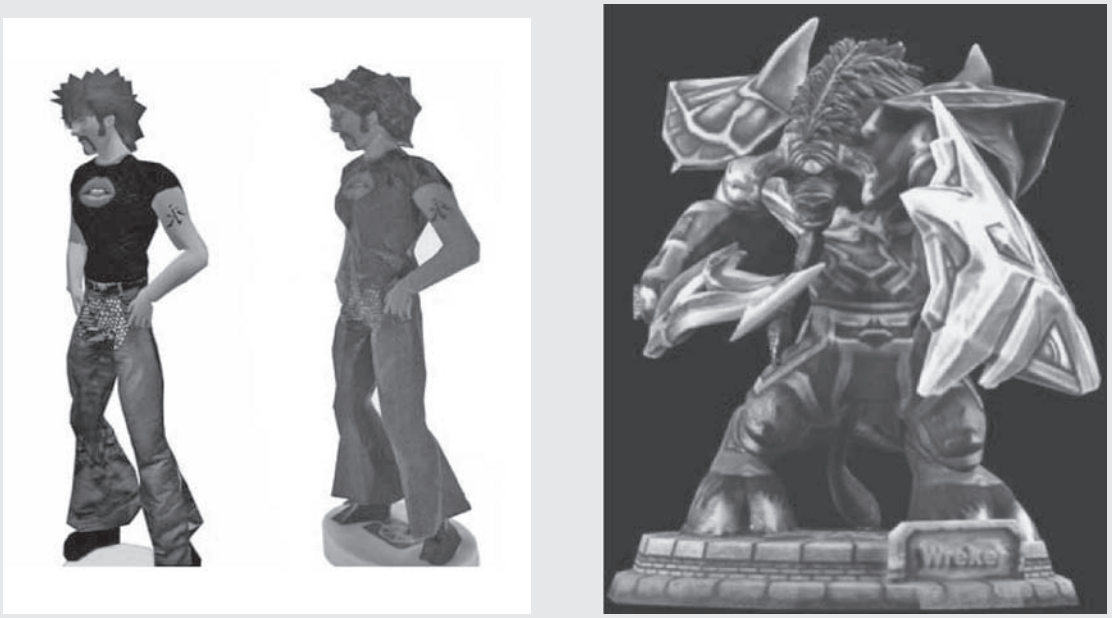
Las piezas producidas mediante el proceso de impresión tridimensional son algo porosas y, por lo tanto, pueden carecer de resistencia. La impresión tridimensional de polvos metálicos también puede combinarse con el sinterizado y la infiltración de metal (vea la sección 17.5) para producir piezas totalmente 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 inoxidables, 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 herramentales (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 álter ego en un mundo ficticio. Muchos juegos de computadora modernos (como Rock Band 2) también permiten a los usuarios producir

(*continúa*)



(a) (b)

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 Fabjectory, 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.

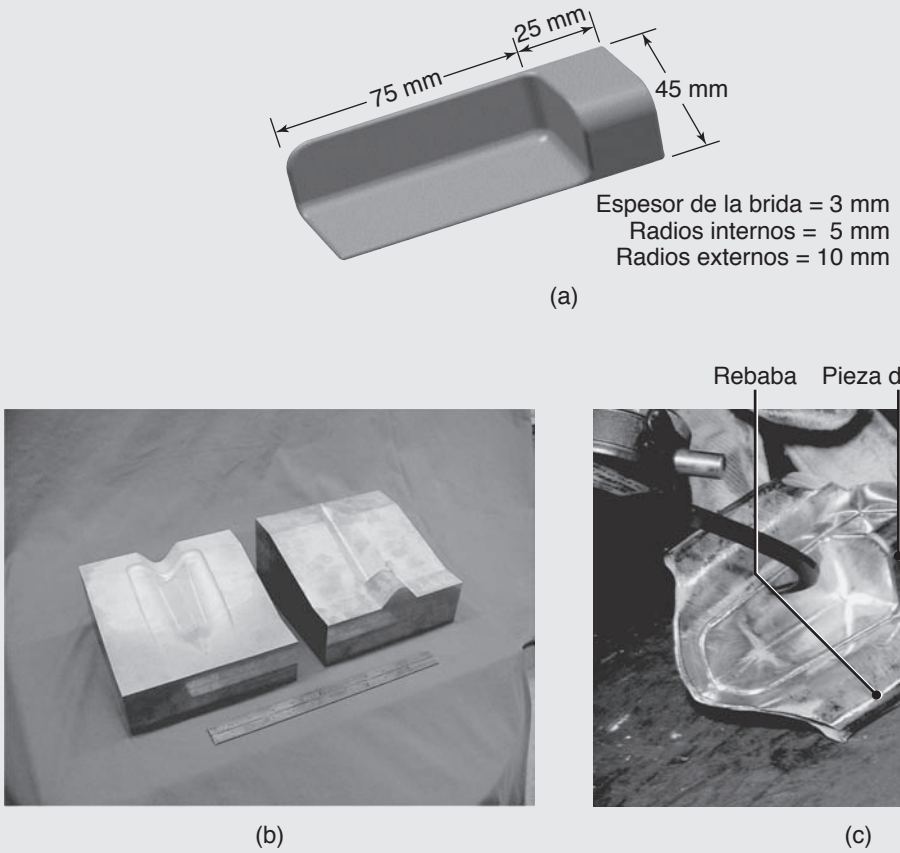


FIGURA 20.12 Accesorio para el fuselaje de un helicóptero. (a) Representación CAD con las dimensiones añadidas. (b) Dados producidos por impresión tridimensional. (c) Pieza forjada final. *Fuente:* (a) Cortesía de The ExOne Company; (b) y (c) Cortesía de Kennametal Extrude Hone Corporation.

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 cuadriculado, con cuadros impresos sobre su superficie, de manera similar al papel gráfico.

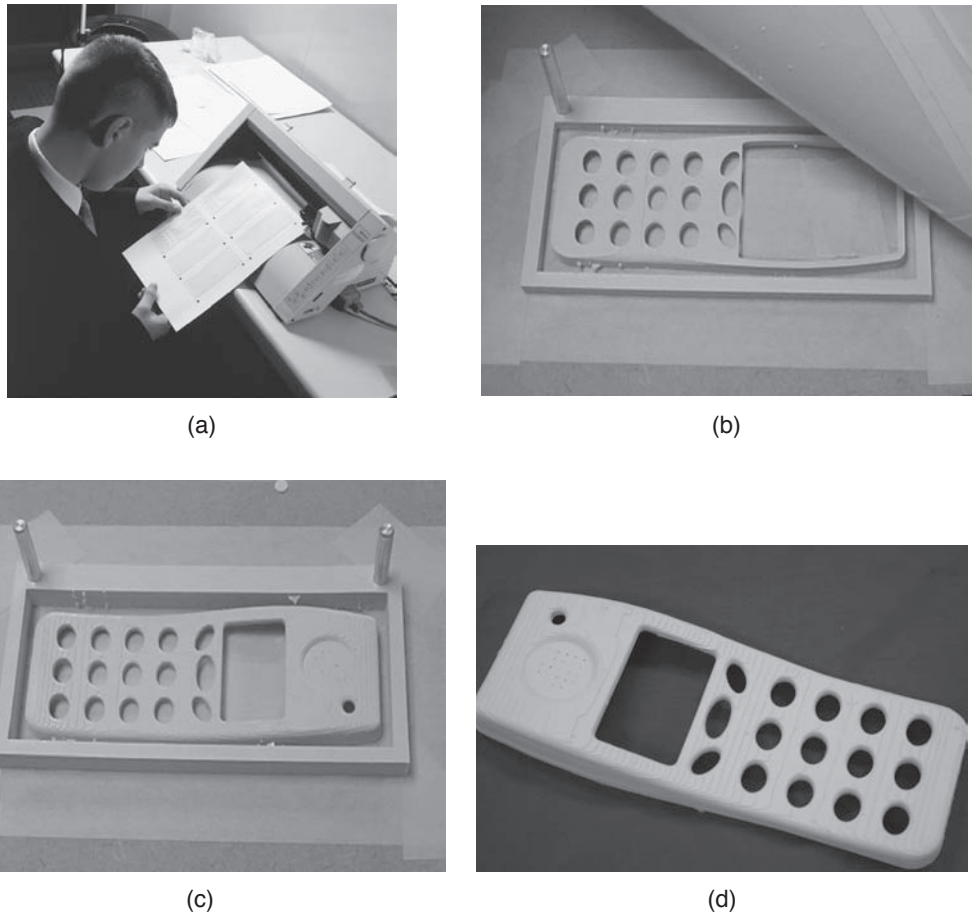


FIGURA 20.13 Producción de un prototipo mediante manufactura de objetos laminados. (a) Las capas se obtienen a partir de una cortadora de vinilo; (b) las capas se apilan manualmente para formar la pieza; (c) ensamble laminado terminado; (d) prototipo final de la pieza. *Fuente:* Cortesía de P. Barraclough, Boxford Ltd.

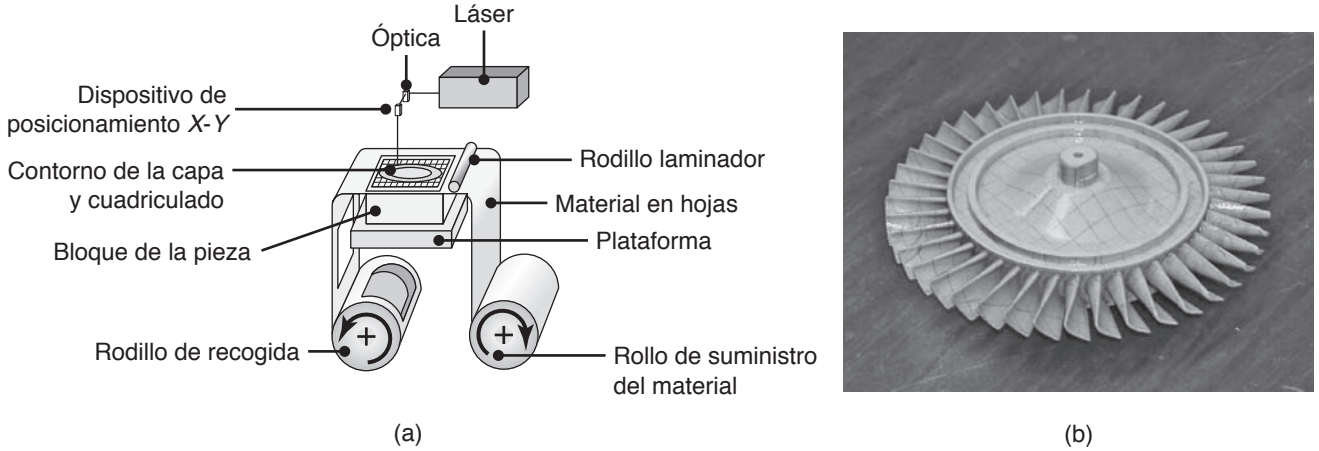


FIGURA 20.14 (a) Ilustración esquemática del proceso de manufactura de objetos laminados. (b) Prototipo de un disco de turbina hecho por LOM. *Fuente:* Cortesía de M. Feygin, Cubic Technologies, Inc.

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.

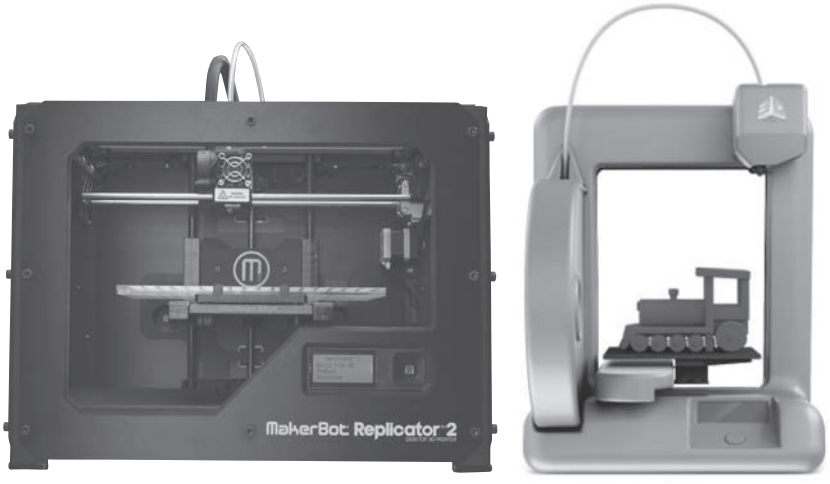
Se tienen algunos ejemplos importantes de productos complejos fabricados sin prototipos físicos (**diseño sin papel**). Tal vez el ejemplo más conocido es el avión Boeing 777, para el cual se evaluaron ajustes mecánicos e interferencias en un sistema CAD y las dificultades se corrigieron antes de que se fabricara el primer modelo de producción (vea la sección 38.5).

20.5 Máquinas autorreplicantes

Código QR 20.7 Características de un Cube. (*Fuente:* Cortesía de 3D Systems).

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.



(a) (b)

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.

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

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 herramentales

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 herramentales 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®

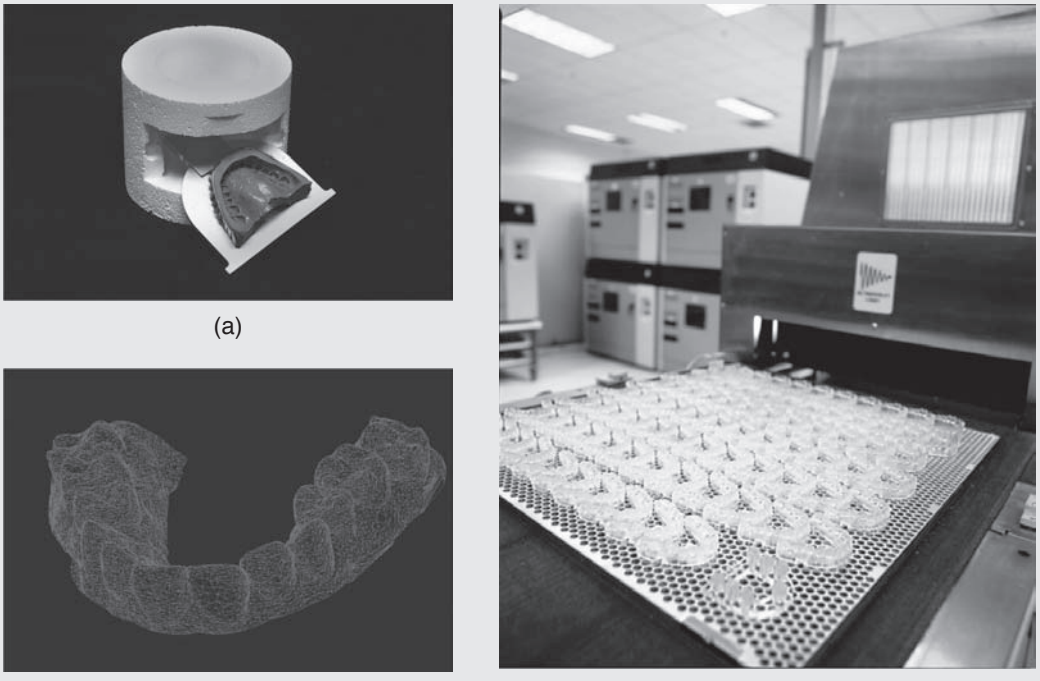
Aparatos de ortodoncia para enderezar dientes han existido por más de 50 años. Estas piezas implican soportes de metal, cerámica o plástico, los cuales se unen adhesivamente a los dientes con accesorios para su conexión a un cable; posteriormente, el aparato se fuerza hasta determinada forma sobre los 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*)

(a) (b)

FIGURA 20.16 (a) Alineador para uso ortodóncico fabricado mediante una combinación de creación rápida de herramentales y termoformado. (b) Comparación de los aparatos ortodóncicos convencionales con los alineadores transparentes. *Fuente:* Cortesía de Align Technology, Inc.



(a) (b) (c)

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 estereolitografía. 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 herramentales

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 herramentales 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 herramentales.
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 herramentales 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

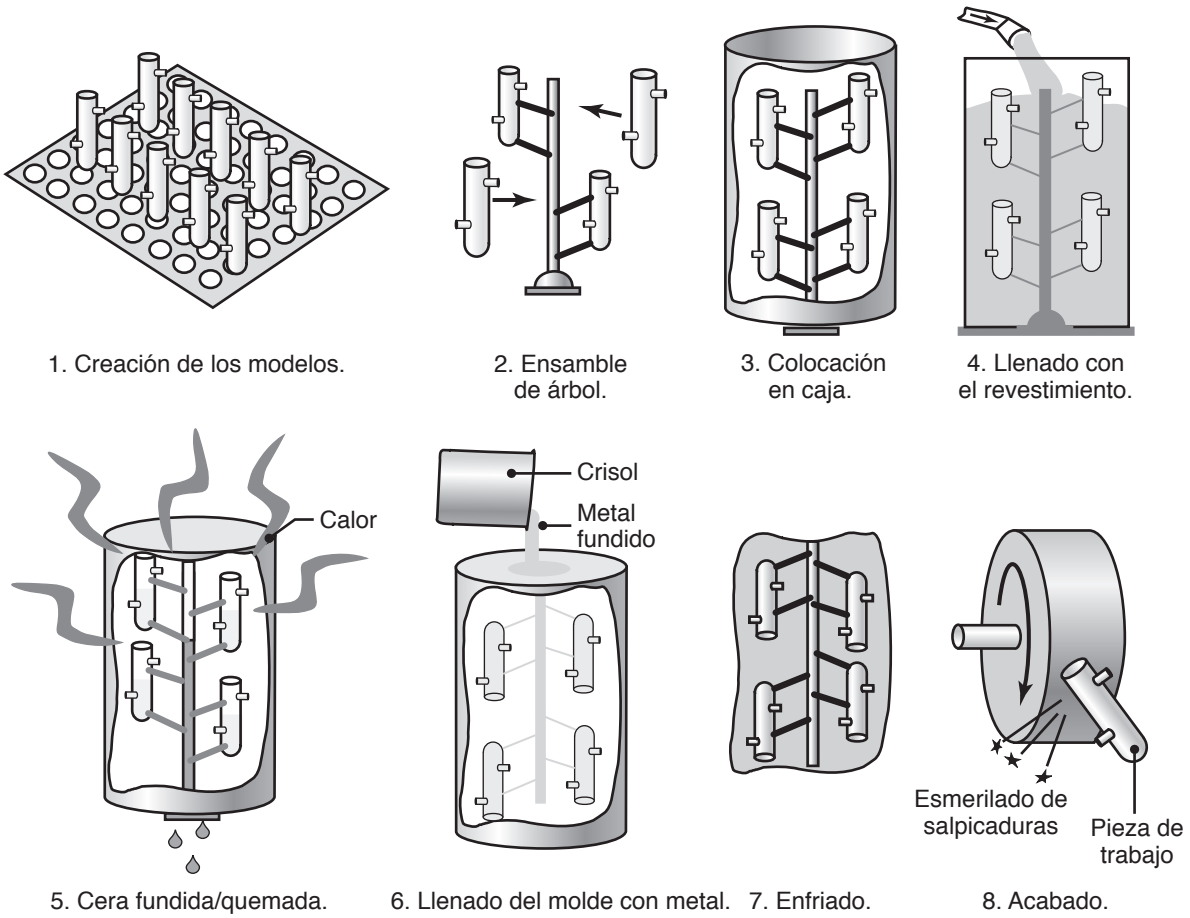


FIGURA 20.18 Pasos de manufactura para la fundición por revestimiento con piezas de cera de prototipado rápido como piezas en bruto; este método utiliza una caja de moldeo para el revestimiento, pero también se puede utilizar un método de cascarón. *Fuente:* Cortesía de 3D Systems, Inc.

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 herramentales 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 herramentales 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 herramentales. 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 herramentales 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 acetal 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.

Herramentales 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 $\times$ 150 mm $\times$ 150 mm (6 pulg $\times$ 6 pulg $\times$ 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.

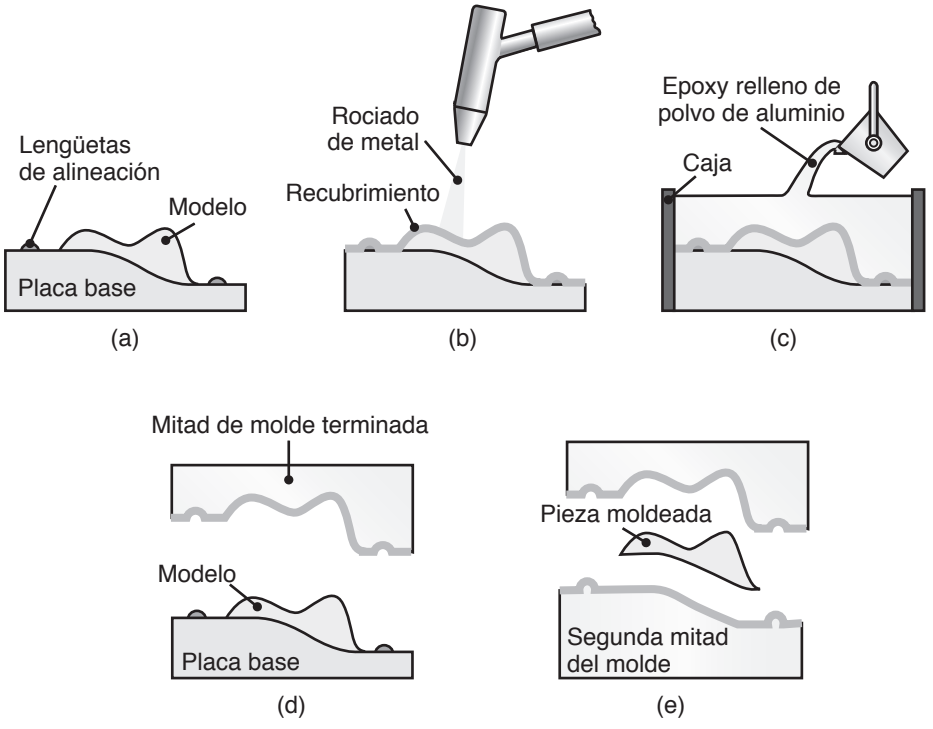


FIGURA 20.19 Producción de herramientas para el moldeo por inyección mediante el proceso de herramentales de metal rociado. (a) Se preparan un modelo y una placa base mediante una operación de prototipado rápido; (b) se rocía una aleación de zinc-aluminio sobre el modelo (vea la sección 34.5); (c) la 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 herramentales 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 grifos 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.

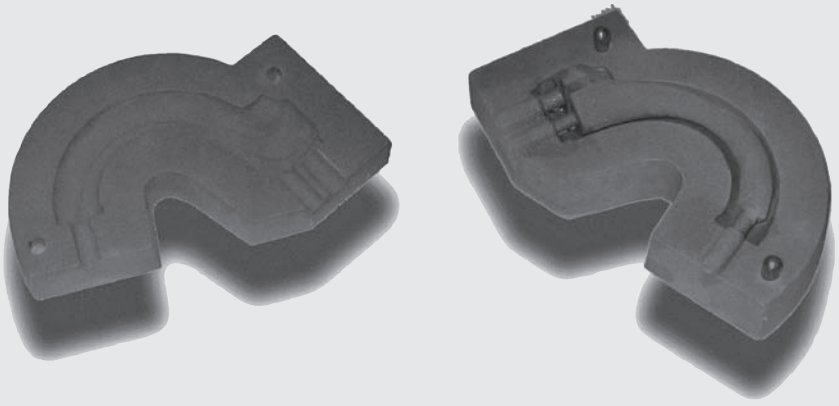


FIGURA 20.21 Moldes de arena producidos mediante impresión tridimensional.

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
AIM directo
Creación rápida de herramentales
Curado de suelo sólido
Estereolitografía
Fabricación de sólidos con forma libre
Fotopolímero
Fusión por haz de electrones
Herramentales de metal rociado
Impresión tridimensional
Keltool
Manufactura de escritorio
Manufactura de objetos laminados
Manufactura de partículas balísticas
Manufactura digital
Manufactura directa
Máquinas autorreplicantes
Modelado MultiJet
Modelado por deposición fundida
Moldeo/fundición de uretano por RTV
PolyJet
Procesos aditivos
Procesos sustractivos
Prototipado virtual
Prototipo
Sinterizado selectivo por láser

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 herramentales.
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 herramentales para el moldeo por inyección? Explique las dificultades que podría encontrarse.
20.19 Explique la importancia de la creación rápida de herramentales 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 desplaza 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.